

Harri Hanhisalo

## **SERVOMOOTTORIN OHJAIN**

Insinöörityö  
Kajaanin ammattikorkeakoulu  
Tekniikan ja liikenteen ala  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Kevät 2008



**Kajaanin  
ammattikorkeakoulu**

## OPINNÄYTETYÖ TIIVISTELMÄ

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	Koulutusohjelma Tietotekniikan koulutusohjelma
Tekijä(t) Harri Hanhisalo	
Työn nimi Servomootorin ohjain	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Sulautetut järjestelmät	Ohjaaja(t) Arto Partanen
	Toimeksiantaja Kajaanin ammattikorkeakoulu, Ismo Talus
Aika Kevät 2008	Sivumäärä ja liitteet 38+3
<p>Insinööriyössä suunniteltiin ja toteutettiin servomootorin ohjain. Ohjain suunniteltiin ohjaamaan tasavirtaservomootoreita. Ohjaimen käyttökohteena tulee olemaan omatekoinen jysinkone, joka muutetaan toimimaan servomootoreilla. Ohjattaviksi moottoreiksi valittiin tasavirtamoottorit niiden helpon ohjauksen takia.</p> <p>Servo-ohjain rakennettiin Microchipin valmistaman mikrokontrollerin ympärille. Piiri sopii hyvin sähkömoottorin ohjaukseen, koska se sisältää kaikki tarpeelliset ohjausportit. Servo-ohjain ottaa vastaan tietokoneelta tiedon mihin suuntaan ja millä nopeudella moottorin tulee pyöriä. Tietokoneen ja moottorin takaisinkytkentäanturin tiedon perusteella ohjain säätää moottorin asemaa. Ohjaimeen suunniteltiin ohjelmallisesti toimiva PI-säädin, joka toteutettiin C-kielillä. Säätimen viritysparametreja voidaan muuttaa sarjaportin kautta käyttäen esimerkiksi HyperTerminal-ohjelmaa. Laitetta testattiin Linux-käyttöjärjestelmään saatavalla EMC2 (the Enhanced Machine Control)-ohjelmistolla.</p> <p>Ohjaimelle laaditut vaatimukset saavutettiin. Työn kautta opittiin sulautetun laitteen eri osia, kuten elektroniikan suunnittelua ja ohjelmointia. Työssä tutustuttiin servotekniikkaan ja säätötekniikkaan, jotka opettivat hyvin paljon moottorinohjauksesta.</p>	
Kieli	Suomi
Asiasanat	Servomootorin ohjain, servomootori, servo-ohjain.
Säilytyspaikka	<input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun Kaktus-tietokanta <input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School School of Engineering	Degree Programme Information Technology
Author(s) Harri Hanhisalo	
Title The Servo Motor Controller	
Optional Professional Studies Embedded Systems	Instructor(s) Arto Partanen
	Commissioned by Ismo Talus
Date Spring 2008	Total Number of Pages and Appendices 38+3
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to design and build a device that could control direct current servo motors. A servo controller is a special electric controller used to control servo motors. It monitors feedback signals from the motor encoder and continually adjusts the deviation from the expected behaviour. Servo systems are used in CNC machines, robots and automation systems.</p> <p>The servo controller was designed around the microcontroller dsPIC30F4012 which is manufactured by Microchip. The servo motor is connected to a controller which is connected to the computer via the parallel port. The computer informs the controller how fast and in which direction the motor has to rotate. The software was developed using the C language for the dsPIC microcontroller. During the development the operation of the controller was tuned by tweaking the software. The servo controller can be connected to a computer via a serial port to change the PI tuning parameters. The tuning parameters can be changed using, for example, the HyperTerminal program.</p> <p>The servo controller was tested by using the Enhanced Machine Controller (EMC2) software. The EMC2 is a CNC mill program and it works under the Linux operating system. It can control machine tools, robots, or other automated devices. The test results show that the device works as planned.</p> <p>The goals set on the servo controller were reached. The project taught how to find information from various sources and how to utilize them in practice.</p>	
Language of Thesis	Finnish
Keywords	Servo motor controller, servo controller.
Deposited at	<input checked="" type="checkbox"/> Kaktus Database at Kajaani University of Applied Sciences <input checked="" type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

## ALKUSANAT

Tämän insinöörityön aiheen sain harrastukseni kautta. Insinöörityö tehtiin Kajaanin ammattikorkeakoululle.

Työn ohjaajalle Arto Partaselle haluan antaa kiitokset hyvästä työn ohjauksesta. Haluan kiittää Jukka Heinoa hyvistä neuvoista työn suunnittelu- ja toteutusvaiheissa sekä Eero Soinista työn kirjallisesta ohjauksesta.

Haluan kiittää myös avopuolisoa ja vanhempia opiskelun tukemisesta, joka teki tästä työstä mahdollisen.

Kajaanissa keväällä 2008

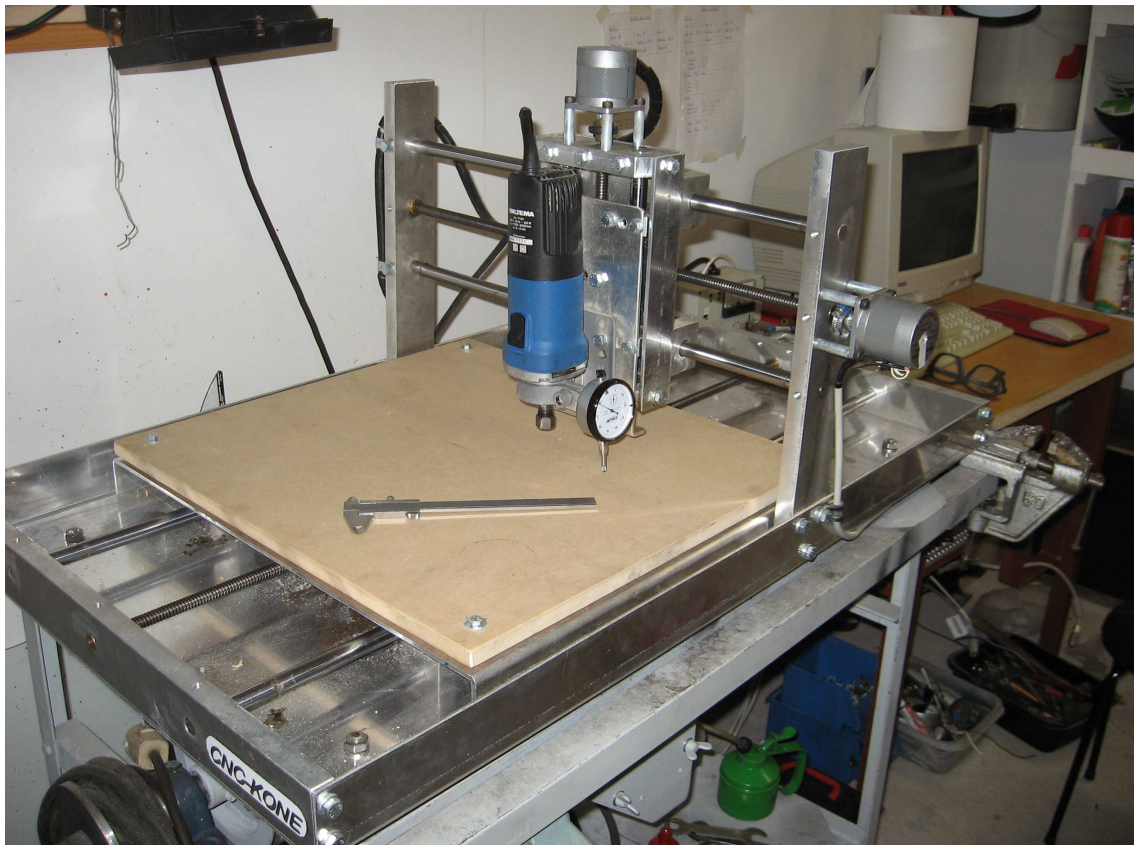
Harri Hanhisalo

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 SERVOTEKNIikka	3
2.1 Servojärjestelmä	3
2.2 Servojärjestelmän anturityypit	4
2.2.1 Pulssianturit	4
2.2.2 Absoluuttianturit	6
2.3 Sääto servojärjestelmässä	6
2.3.1 P-säädin	7
2.3.2 PI-säädin	8
2.3.3 PID-säädin	9
2.4 Säätimen viritys	10
3 TASASÄHKÖMOOTTORIT	12
3.1 Tasasähkömoottorityypit	13
3.2 Tasavirtaservomoottorit	16
3.3 Tasavirtaservomoottorin ohjaaminen	16
4 TYÖN TOTEUTUS	19
4.1 Elektroniikan suunnittelu	20
4.2 Piirilevyn suunnittelu	27
4.3 Ohjelmiston suunnittelu	28
5 TESTAUS JA VIRITTÄMINEN	32
5.1 Ohjaimen virittäminen	33
5.2 Ohjaimen lopputestaus	33
6 TYÖN ANALYSOINTI	35
7 YHTEENVETO	37
LÄHTEET	38
LIITTEET	

## 1 JOHDANTO

Insinöörityön tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa servomoottorin ohjainyksikkö. Idean työhön sain harrastuksen kautta. Olen rakentanut omakekoisen CNC-jyrsimen, jossa ohjainmoottoreina ovat askelmoottorit. Moottoreiden tehtävänä on liikutella akseleita tietokoneen antamien käskyjen mukaisesti. Jyrsin on kolmiakselinen ja valmistettu pääosin alumiinista. Jyrsimellä voidaan jyrsiä puuta, muovia ja kevytmetalleja. Tarkoituksena on ollut muuttaa laite toimimaan servomoottoreilla. Tästä sain idean suunnitella servo-ohjaimen, jolla servomoottoreita voidaan ohjata. Insinöörityöksi aihe tuntui mielenkiintoiselta, sopivan haasteelliselta ja hyödylliseltä. Kuvassa 1 on esitetty omarakenteinen jyrsinkone, joka on tarkoitus muuttaa servokäyttöiseksi.



Kuva 1. Omarakenteinen jyrsinkone.

Servo-ohjaimesta on tarkoitus kehittää tarkka, tehokas ja nopea ohjainyksikkö, jota ohjataan tietokoneen avulla.

Ohjain ottaa vastaan tietokoneelta tiedon, millä nopeudella ja mihin suuntaan moottorin tulee pyöriä. Moottorinohjain ohjaa moottoria vastaanottamalla servomoottorin asematiedon ja vertaa sitä tietokoneen antamaan tietoon. Tämän tiedon perusteella se ohjaa moottoria haluttuun nopeuteen ja suuntaan.

Servolla tarkoitetaan asemointiin perustuvaa järjestelmää, jossa asema-anturista on takaisinkytkentä toimilaitteen ohjauspiiriin. Sen tehtävänä on ohjata järjestelmä haluttuun asemaan ja nopeuteen. Jo toisen maailmansodan ajoilta lähtien on servotekniikkaa käytetty hyödyksi nopeiden ja tarkkojen liikkeiden tuottamisessa (laivat, lentokoneet, tutkat, ohjukset). Nykyisiä servotekniikan sovelluksia ovat teollisuusrobotit, jyrsinkoneet, hitsauskoneet ja erilaiset siirto- ja kuljetuslaitteet. Käyttökohteesta riippuen säädettävän suureen mukaan puhutaan asema-, nopeus-, voima- tai momenttiservoista. [1.]

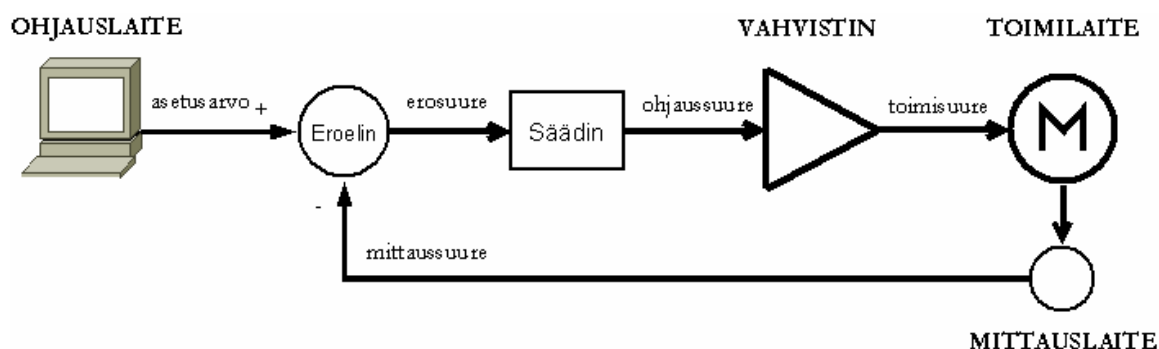
Sana CNC tulee englannin kielen sanoista Computer Numerical Control, mikä tarkoittaa tietokoneohjattua numeerista ohjausta.

## 2 SERVOTEKNIikka

Servotekniikassa järjestelmän tehtävänä on ohjata toimilaite haluttuun arvoon. Toimilaitteina voivat olla erilaiset moottorit tai sylinterit. Servojärjestelmässä sen oleellisin osa on takaisinkytkentä. Takaisinkytkennän avulla mitataan lähtöarvo, jota verrataan ohjearvoon. Takaisinkytkentöjä voi olla useita. Koneautomaatiossa yleisimmät takaisinkytkennät ovat nopeus- ja asematieto. [1.]

### 2.1 Servojärjestelmä

Kuva 2 havainnollistaa servojärjestelmän periaatteellista rakennetta. Ohjauslaitteena on yleensä tietokone tai ohjelmoitava logiikka, joka asettaa asetusarvon servojärjestelmälle. Asetusarvo voidaan sanoa myös ohjearvoksi. Asetusarvo johdetaan eroelimen kautta säätimeen, jossa se muodostaa erosuuresta määrättyjen, usein ohjelmoitavien menetelmien mukaisesti ohjaussuuren. Vahvistimen tehtävänä on muuntaa ohjaussuure toimilaitteelle sopivaksi toimisuureksi. Takaisinkytkentäanturista saatu signaali muokataan sopivaksi ja johdetaan eroelimeen, jossa signaali vähennetään asetusarvosta. Asetusarvon ja mittausarvon ollessa yhtä suuret on toimilaite saavuttanut halutun tilan.



Kuva 2. Servojärjestelmän periaatteellinen rakenne.

Yksinkertaisimmillaan asetusarvo voidaan toteuttaa potentiometrin avulla, mutta kehittyneimmissä järjestelmissä se annetaan digitaalisena. Takaisinkytkennässä voidaan käyttää erilaisia antureita halutun suureen mittaamiseen, kuten potentiometriä tai pulssianturia. [1.] Ohjauslaite, eroelin ja säätölohko muodostavat kokonaisuuden, jota



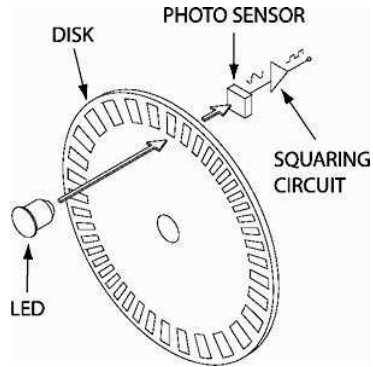
kutsutaan säätimeksi. Säätojärjestelmää, jossa on takaisinkytkentä, sanotaan suljetuksi järjestelmäksi (closed loop system, feedback control system). Jos järjestelmää ohjataan ilman takaisinkytkentää, puhutaan avoimesta järjestelmästä (open loop control system).

## 2.2 Servojärjestelmän anturityypit

Servojärjestelmissä ohjain tarvitsee jatkuvaa tietoa asemasta. Suoraviivaista liikettä mitataan lineaarisesti liikkuvilla antureilla, ja kulmalikettä mitataan tavallisesti pyörivillä antureilla. Anturit voidaan jakaa kahteen ryhmään: analogisiin ja digitaalisiin. Analoginen anturi antaa lähtöjännitteen, joka on verrannollinen siirtymään tai nopeuteen. Potentiometrit ovat yleisempiä asemanmittausantureita. Digitaaliset anturit ovat pulssiantureita tai koodiantureita. Pulssianturista saadaan pulssijono, jonka määrä on verrannollinen siirtymään. Koodianturista eli absoluuttianturista saadaan digitaalisana, joka vastaa tiettyä asemaa. [1.]

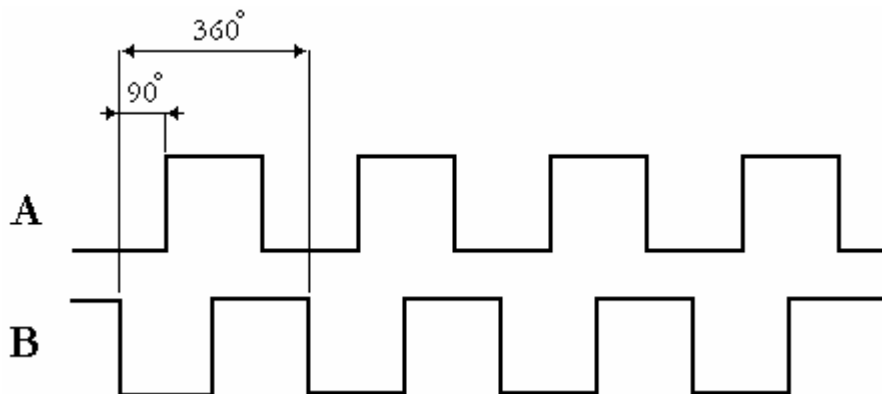
### 2.2.1 Pulssianturit

Pulssianturin käytössä tarvitaan absoluuttisen aseman määrittämistä varten laskuria, joka laskee anturin antamat pulssit. Pulssianturit ovat yleensä optisesti toteutettuja. Optinen pulssianturi muodostuu hilakiekosta, valolähteestä ja valonilmaisimesta. Hilakiekossa on määrävälein valoa läpäiseviä ja valoa estäviä kohtia. Hilakiekko on sijoitettu valolähteen ja valonilmaisimen väliin. Hilakiekkoa pyöritettäessä kiekko katkoo valoa määrävälein ja valonilmaisimen lähtönä saadaan pulssijono. Kiekossa olevien sektoreiden määrästä riippuu, kuinka tarkasti anturin kiertymää voidaan mitata. Yksinkertainen pulssianturi ei pysty antamaan pyörimissuuntaa, mutta kaksi valolähdettä peräkkäin tai kaksi hilakiekkoa peräkkäin ja kaksi rinnakkaista valonilmaisinta pystyvät antamaan suunnan pyörimiselle. Tällöin voidaan puhua niin sanotuista inkrementtiantureista. Kuvassa 3 on esitetty periaatteellinen kuva optisesta pulssianturista. [2.]



Kuva 3. Pulssianturi. [3.]

Tavallisesti anturissa on kolme pulssilähtöä, joista kaksi on liikettä ilmaisevia pulssikanavia ja näiden vaihe-ero toisiinsa nähden on 90 astetta. Kolmannesta pulssilähdöstä saadaan tarkistuspulssi yhtä anturinkierrosta kohden. Kuvassa 4 on esitetty inkrementtipulssit, josta huomataan pulssien vaihe-erot. Inkrementtipulsseja kutsutaan yleensä quadrature-signaaliksi.

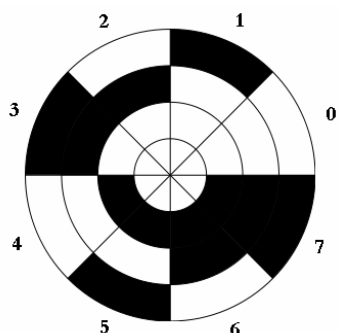


Kuva 4. Quadrature-signaali.

Tyydyttävään tulokseen päästään anturilla, jonka yhden kanavan pulssimäärä on 250 pulssia kierroksella. Tällaisella anturilla päästään itse asiassa nelinkertaiseen tulokseen, kun otetaan huomioon molempien kanavien vaihe-eron nousevat ja laskevat reunat. Lineaarisen pulssianturin toimintaperiaate on samanlainen kuin kulmaa mittaavalla pulssianturilla, mutta kiekko on levitetty viivaimen muotoon. [4.]

### 2.2.2 Absoluuttianturit

Absoluuttianturit ilmoittavat ohjausjärjestelmälle toimilaitteen todellisen sijainnin. Kuvasta 5 ilmenee lineaarisen absoluuttianturin periaate.



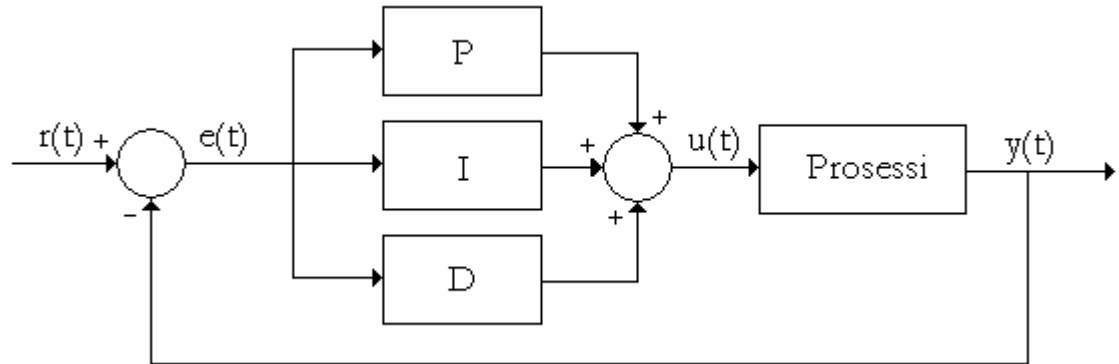
Kuva 5. Absoluuttianturin binaarinen koodikiekkö.

Valoa heijastavat tai läpäisevät sektorit muodostavat binaariarvon. Jokaista kanavaa kohden tarvitaan oma valonilmaisim. Lisäämällä kanavia saadaan tarkkuutta kasvatettua, koska eri tietoja voidaan välittää  $2^n$  kappaletta. Absoluuttinen pulssianturi tietää jatkuvasti kiertymäkulmansa, eikä pulssien jatkuvaa laskentaa tarvita. Binaariarvon sijaan voidaan käyttää myös muita koodaustapoja, esimerkiksi BCD- tai GRAY-koodaustapaa. [3.]

### 2.3 Sääto servojärjestelmässä

Järjestelmää, jonka suuretta pyritään säädöllä hallitsemaan, kutsutaan prosessiksi. Säätojärjestelmää sanotaan takaisinkytketyksi, koska säädössä käytetään takaisinkytkentäperiaatetta. Säätoä käytetään järjestelmissä useistakin syistä. Sen avulla voidaan pienentää prosessissa tapahtuvien häiriötekijöiden vaikutusta. Esimerkiksi nopeuden säädössä olennainen häiriötekijä on kuormitus. Kuormitus voi muuttua yllättäen, jolloin nopeuden pitäminen ohjearvossa voi olla vaikeaa ilman säätöä. Säätojärjestelmä pyrkii pitämään erosignaalin nollana, jolloin järjestelmä automaattisesti korjaa häiriöiden aiheuttamat muutokset. Mitä tarkempi säätö halutaan, sitä enemmän erosignaalia täytyy vahvistaa. Vahvistusta ei voida kasvattaa kuitenkaan äärettömästi, koska se aiheuttaa järjestelmälle värähtelyä ja epästabiilisuutta. Sääntöä, jonka mukaan säätojärjestelmä toimii, kutsutaan säätöalgoritmiksi. Säätoalgoritmi on yleensä käsky- ja mittaussignaalin erotuksen

muodostaminen ja tästä saadun korjausarvon vahvistaminen. PID-säädin on yksi säätötekniikan perussäätimistä. PID-säätimen nimi tulee sanoista proportional integral derivative. Kuvassa 6 on PID-säätimen periaatteellinen lohkokkaavio. [5.]



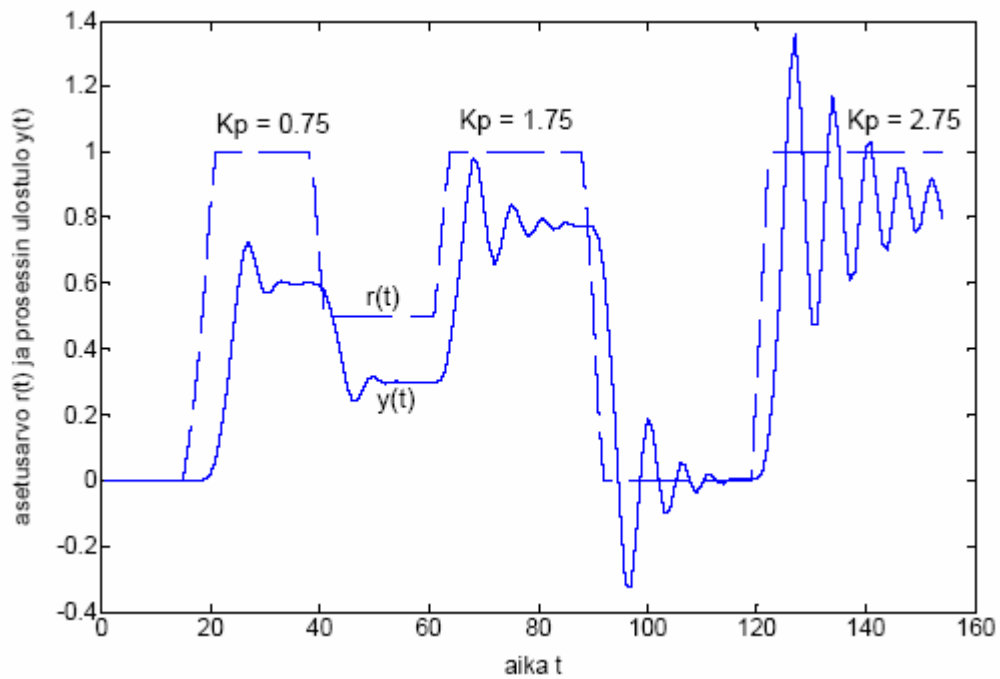
Kuva 6. PID-algoritmin lohkokkaavio.

### 2.3.1 P-säädin

P-algoritmi on PID-säätimen perusta. P-säätimellä tarkoitetaan toimintoa, jossa lähtösignaali  $u(t)$  on suoraan verrannollinen tulosignaaliin eli erosuureeseen  $e(t)$ . Lähtösignaalin matemaattinen yhtälö on esitetty kaavassa 1.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (1)$$

Kerroin  $K_p$  on P-säätimen viritysparametri, ja sitä sanotaan vahvistukseksi. Ohjausmuutoksen suuruus riippuu vahvistuksesta  $K_p$ ; mitä suurempi vahvistus, sitä voimakkaammin ohjaus muuttuu. P-säädin jättää herkästi pysyvän poikkeaman ohjearvosta, ja tämä johtuu yleensä liian pienestä vahvistuksesta. Poikkeamaa voidaan korjata kasvattamalla vahvistusta, mutta liika vahvistus aiheuttaa säätöjärjestelmälle värähtelyä tai jopa epästabiilisuutta. Oikea vahvistus riippuu käyttökohteesta, ja se löydetäänkin helpoiten kokeilemalla. [6.] Kuvasta 7 selviää P-säätimen toiminta. Kuvasta huomataan, kuinka vahvistuksen kasvattaminen pienentää poikkeamaa, mutta samalla kasvattaa värähtelyä. Katkoviivalla on esitetty ohjearvo ja viivalla prosessin ulostulo.



Kuva 7. P-säätimen toiminta eri vahvistusarvoilla. [7.]

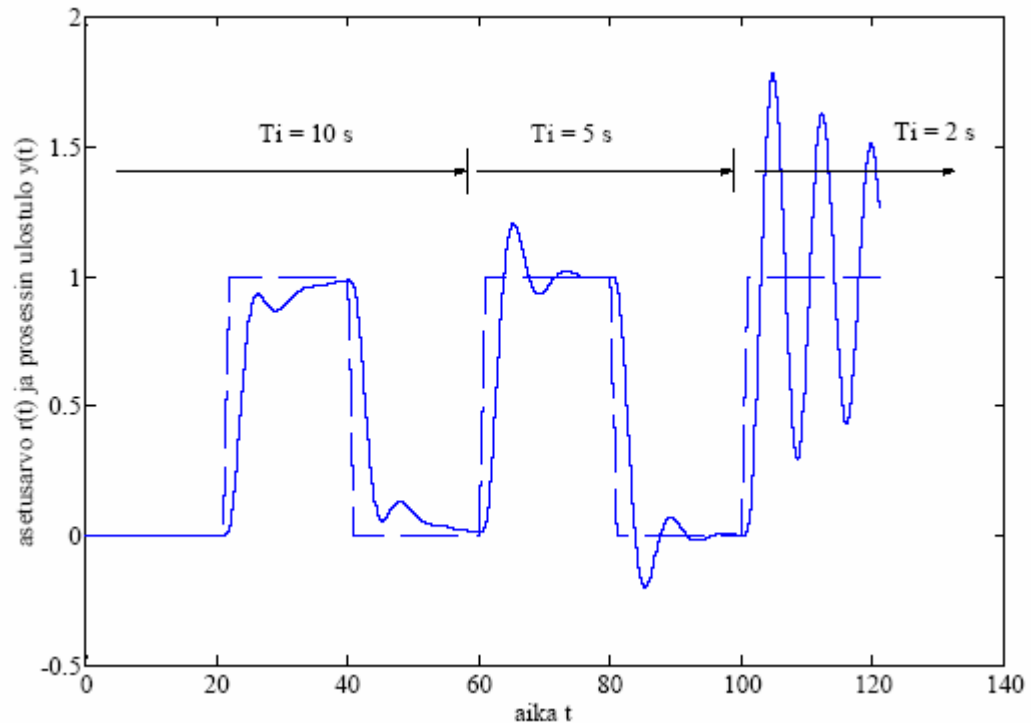
### 2.3.2 PI-säädin

PI-säädin muodostuu kahdesta osasta, P-termistä ja I-termistä. I-termin eli integroivan osan tehtävänä on poistaa P-säädössä tapahtuvaa poikkeamaa. PI-säädin voidaan kirjoittaa kaavan 2 muotoon.

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (2)$$

Erosuureen ollessa erisuuri kuin nolla alkaa ohjesuure P:n vaikutuksesta ajaa askelmaisesti eroa korjaavaan suuntaan. Samanaikaisesti I:n vaikutuksesta eroa pienennetään, kunnes se on lopulta nolla. Kun integrointiaika  $T_I$  on arvoltaan suuri, toimii säädin P-säätimen tavoin ja muutostila näkyy vasta säädettävän suureen loppuvaiheessa. I-termin vaikutuksesta erosuure menee lopulta nolleen ja säätöpoikkeama ei näin ollen synny säädettävään suureeseen. Integrointiaikaa pienennettäessä järjestelmä nopeutuu, mutta samalla se kasvattaa värähtelyä säätöjärjestelmälle. [6.] Kuva 8 esittää PI-säätimen toimintaa eri integrointiajoilla. Kuvasta huomataan, kuinka säädin korjaa säätöpoikkeaman ja kuinka integrointiaika vaikuttaa sen

nopeuteen. Isolla integrointiajalla säätöpoikkeaman korjautumiseen menee pidempi aika ja liian lyhyellä integrointiajalla säädin rupeaa värähtelemään.



Kuva 8. PI-säätimen toiminta eri integrointiajoilla. [7.]

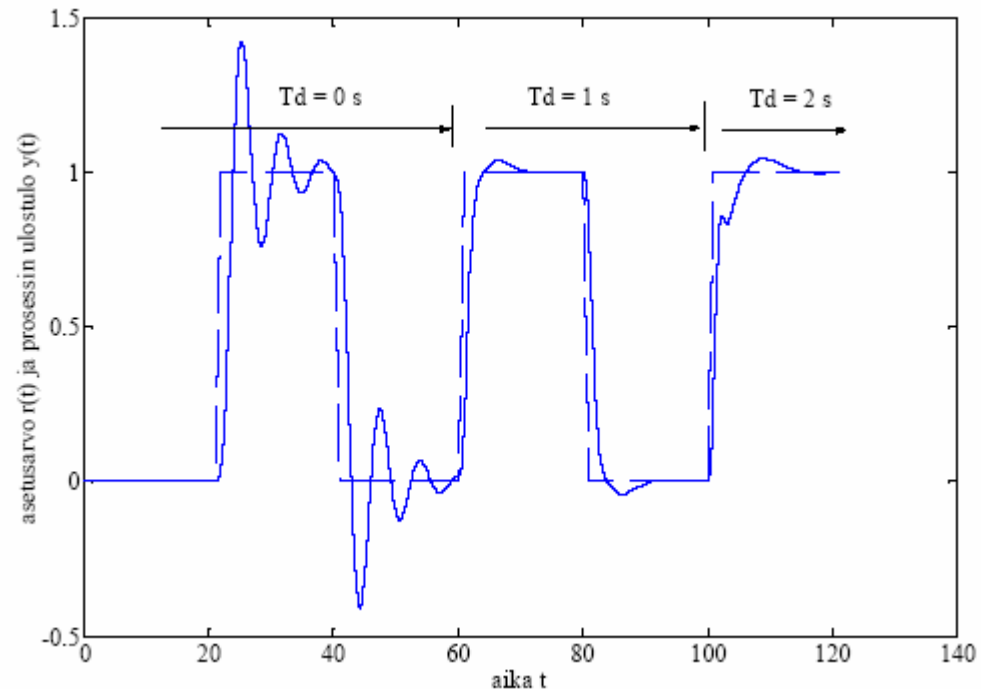
### 2.3.3 PID-säädin

PID-säädin koostuu kolmesta osasta. Siinä on mukana  $T_D$  eli derivointiaikavakio. PID-säätimen etuna PI-säätöön verrattuna on sen nopeampi reagointi muuttuvaan erosuureeseen. D-termi tavallaan ennustaa tulevaa, sillä se ottaa huomioon erosuureen muutosnopeuden. D-säätöä kutsutaan myös niin sanotuksi ennakoivaksi säädöksi, koska se pyrkii poistamaan poikkeamaa ennen kuin sitä kerkeää edes syntyä. Kaavassa 3 on esitetty PID-säätimen yhtälö, jossa on yhdistetty kaikki PID-säätimen osat.

$$u(t) = K_P \left( e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{d(t)}{dt} e \right) \quad (3)$$

Derivointiaikavakio ilmaisee sen ajan, jonka kuluessa säätö saa lisävahvistusta nopean eromuutoksen tapahduttua. Eromuutoksien ollessa hitaita on D-termin vaikutus vähäistä.

Kuva 9 esittää PID-säätimen toimintaa eri derivointiajoilla. Mitä pienemmäksi derivointiaika on asetettu, sitä nopeammin se palaa nollaan.



Kuva 9. PID-säätimen toiminta eri derivointiajoilla. [7.]

Jotta PID-säädöstä olisi jotakin hyötyä, tulee sen olla hyvin viritetty. Säätöjärjestelmien virittämiseksi on kehitetty erilaisia systemaattisia menetelmiä. Tällaisia menetelmiä ovat esimerkiksi Ziegler-Nicholsin askelvastemenetelmä ja värähtelymenetelmä. [6.]

## 2.4 Säätimen viritys

Virittämisellä tarkoitetaan oikeiden vitysparemetrien määrittämistä. Hyvässä säätöjärjestelmässä ei saa esiintyä liiallista värähtelyä ja ohjearvon sekä oloarvon erotuksen tulisi olla mahdollisimman pieni. Tämän tiedon perusteella voidaan lähteä säädintä virittämään kokeilemalla eri suuria parametriaivoja. Kokeellinen vityks onnistuu kohtuullisesti P-säätimelle, koska siinä on vain yksi viritettävä parametri. PID-säädön vityksessä sen sijaan kokeellinen hyvien parametriaivojen löytäminen voi olla hyvinkin vaikeaa. Säädintä viritettäessä tulee säädettävän järjestelmän olla tilassa, missä sitä tullaan

käyttämään. Esimerkiksi servo-ohjainta viritettäessä tulee moottoriin olla kytketty sille oikea käyttökuorma.

Ziegler-Nicholsin värähtelymenetelmässä viritetään säätöjärjestelmä aluksi P-säädöksi, eli asetetaan integrointi äärettömäksi tai mahdollisimman suureksi ja derivointivakio nolaksi sekä  $K_p$  melko pieneksi. Tämän jälkeen tehdään ohjearvoon pieniä muutoksia, että säätö lähtisi toimimaan. Kasvatetaan  $K_p$ :n arvoa pikku hiljaa ja tehdään ohjearvoon muutoksia samalla, kun tarkkaillaan säädettävää suuretta. Jatketaan  $K_p$ :n arvon kasvattamista, kunnes säätö alkaa värähdellä vakioamplitudilla. Vahvistuksen arvoa, jolla säätöjärjestelmä värähtelee vakioamplitudilla, sanotaan kriittiseksi vahvistukseksi  $K_{pkr}$  ja tämän jaksonpituutta kriittiseksi jaksonpituudeksi  $T_{kr}$ . Taulukon 1 avulla saadaan kohtalainen suuntaa antava viritys. [6.]

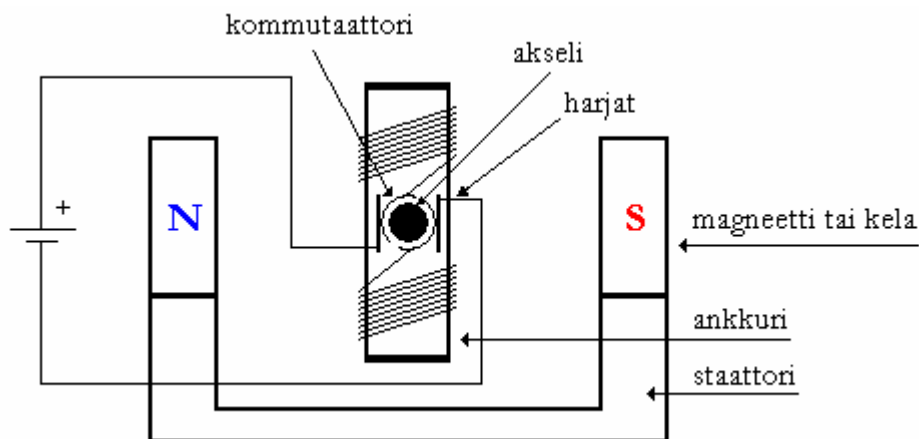
Taulukko 1. Värähtelymenetelmän viritysparametrit.

Säädin	$K_p$	$T_I$	$T_D$
P	$0,5K_{pkr}$		
PI	$0,4K_{pkr}$	$0,8T_{kr}$	
PID	$0,6K_{pkr}$	$0,5T_{kr}$	$0,125T_{kr}$



### 3 TASASÄHKÖMOOTTORIT

Tasasähkökone on vanhin pyörivistä sähkökoneista. Tasasähkökonetta voidaan periaatteessa käyttää tasasähkögeneraattorina ja tasasähkömoottorina, koska niiden rakenteet eivät eroa toisistaan. Tasasähkömoottorin etuina ovat halpa hinta ja hyvä vääntömomentti sekä sen helppo ohjaus. Tasasähkömoottorin huonona puolena on sen harjoista johtuva huollontarve. Nykyisin vaihtosähköllä toimivat koneet ovatkin osittain korvanneet tasasähkökoneen säätötapojen kehittymisen vuoksi. Tasasähkökoneen tekniset ominaisuudet riippuvat moottorin magnetointitavasta. Tämä voidaan toteuttaa kestopagneettien tai magnetointikäimityksen avulla. Magnetointikäimityksestä riippuen tasasähkömoottorit jaetaan seuraaviin ryhmiin: vierasmagnetoidut moottorit, sivuvirtamoottorit, sarjamoottorit, kompaundimoottorit. Pienet tasavirtamoottorit on viisainta magnetoida kestopagneetin avulla, koska magneettikäimin tarvitsema teho on pienissä moottoreissa merkittävä suhteessa moottorin nimellistehoon. Kuvassa 10 on esitetty yksinkertainen harjallinen tasasähkömoottori.



Kuva 10. Yksinkertainen tasasähkömoottori.

Moottoriin kuuluu kiinteä staattori ja pyörivä ankkuri. Ankkurissa on ankkurikäimitys, jonka päät on yhdistetty kommutaattoriin. Ankkurivirta johdetaan harjojen kautta kommutaattoriin ja sieltä ankkurikäimitykseen. Kun ankkurikäimitykseen kytkeytyy virta, johtimen ympärille muodostuu magneettikenttä, jonka vuon tiheys on verrannollinen ankkurivirran voimakkuuteen. Ankkurin ympärillä olevan staattorin kestopagneetit kehittävät toisen magneettikentän. Johtimen ollessa kohtisuorassa kestopagneettien aikaansaamaa

magneettivuota kohden kehittyvä voima on suurin. Näitten kenttien väliset voimat saavat aikaan ankkurin vääntömomentin, joka on kaavan 4 mukainen. [8.] [9.]

$$T = k I_a \Phi \quad (4)$$

Tasasähkömoottorin pyörimisnopeuden perusyhtälö on esitetty yhtälössä 5, jossa  $n$  = pyörimisnopeus,  $U$  = ankkuriin vaikuttava jännite,  $k$  = konevakio,  $\Phi$  = magneettivuoto,  $R_a$  = ankkuriin resistanssi,  $I_a$  = ankkurivirta.

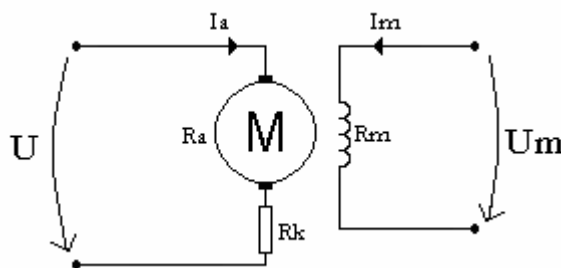
$$n \approx \frac{U - R_a I_a}{k \Phi} \quad (5)$$

Yhtälöstä nähdään, että tasasähkömoottorin pyörimisnopeutta voidaan kasvattaa kasvattamalla ankkurijännitettä tai pienentämällä magneettivuota.

### 3.1 Tasasähkömoottorityypit

#### Vierasmagnetoitu

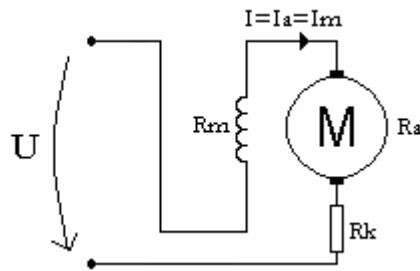
Vierasmagnetoidussa moottorissa virta syötetään magnetointikäämitykseen erillisestä teholahteesta. Ennen kuin moottorin napajännite  $U$  voidaan kytkeä päälle, on huolehdittava, että magnetoimisjännite  $U_m$  on kytketty magnetointikäämitykseen. Kuvassa 11 on vierasmagnetoidun tasasähkömoottorin virtapiiripiirros.



Kuva 11. Vierasmagnetoidun tasasähkömoottorin periaatteellinen virtapiiripiirros.

## Sarjamoottori

Sarjamoottorin magnetointikäämi valmistetaan paksusta johdinlangasta, ja siinä on suhteellisen vähän johdinkierroksia sekä sen resistanssi on pieni. Magnetointikäämitys kytketään sarjaan ankkurikäämityksen kanssa kuvan 12 mukaisesti. Sarjamoottori on hyvin yleinen moottorityyppi erilaisissa sähkökäyttöisissä kodinelektroniikkalaitteissa.



Kuva 12. Sarjamoottorin periaatteellinen virtapiiripiirros.

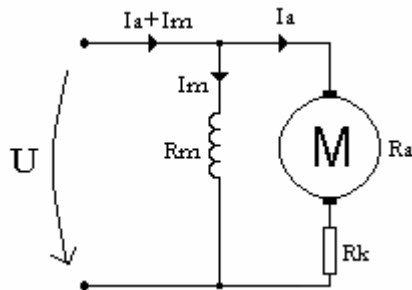
Sarjamoottori voidaan käynnistää kahdella tavalla: syöttämällä moottoriin jännite  $U$  tai säätämällä moottorin kanssa sarjaan kytkettyä käynnistysvastusta  $R_k$ . Moottorin käynnistyessä kasvaa sen virta hyvin suureksi, koska magnetointikäämin resistanssi on pieni. Virtaa voidaan rajoittaa käynnistysvastuksen  $R_k$  avulla. Sarjamoottori saa käydessään tyhjäkäynnillä teoriassa kaavan 6 mukaisen tyhjäkäyntipyörimisnopeuden yhtälön, missä  $n_0$  = moottorin tyhjäkäyntinopeus ja  $\Phi_r$  = magneettipiirin remananssivuor.

$$n_0 = \frac{U}{K\Phi_r} \quad (6)$$

Koska  $\Phi_r$  ja  $n_0$  ovat hyvin pieniä moottorin käydessä tyhjäkäynnillä, saa  $n_0$  hyvin suuren arvon eli kovan pyörimisnopeuden. Tästä sanotaan, että moottori ryntää. Sarjamoottoria ei saa siis koskaan päästää pyörimään tyhjäkäynnillä. Sarjamoottorin pyörimissuuntaa on muutettava joko magnetointikäämityksessä tai ankkurikäämityksessä. [9.]

### Sivuvirtamoottori

Sivuvirtamoottoreissa magnetointikäämitys kytketään ankkurikäämityksen rinnalle, ja käämitys on valmistettu ohuesta langasta. Magnetointikäämityksessä on suhteellisen paljon johdinkierroksia. Magnetointikäämitys voi olla kytketty rinnan syötettävän tasajännitelähteen kanssa, mutta tällöin sen tulee pysyä vakiona. Sivuvirtamoottorin virtapiiripiirros on esitetty kuvassa 13. Sivuvirtamoottorin magneettivuo pysyy vakiona riippumatta koneen kuormituksesta. Yhtälössä 4 nimittäjä pysyy vakiona, koska  $U \gg R_a I_a$ . Tästä syystä pyörimisnopeus  $n$  pysyy lähes vakiona riippumatta kuormituksesta. Tämä onkin yksi sivuvirtamoottorin tärkeä käyttötekniinen ominaisuus. [10.]

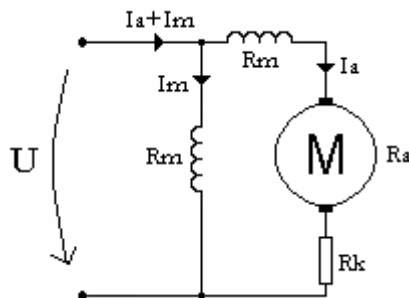


Kuva 13. Sivuvirtamoottorin periaatteellinen virtapiiripiirros.

Sivuvirtamoottorin pyörimissuuntaa muutettaessa täytyy virran suuntaa muuttaa, joko magnetointikäämityksessä tai ankkurikäämityksessä. Tästä syystä sivuvirtakoneen pyörimissuuntaa ei voida muuttaa vaihtamalla moottorin napajännitettä toisinpäin. [9.]

### Kompaundimoottori

Kuvassa 14 on esitetty myötäkompaundimoottorin virtapiiripiirros.



Kuva 14. Kompaundimoottorin periaatteellinen virtapiiripiirros.

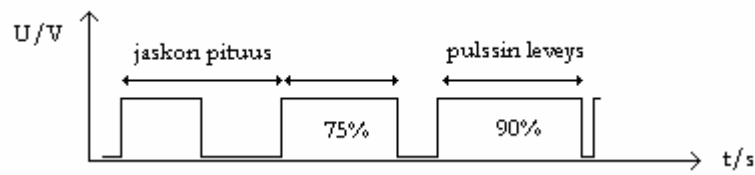
Kompaundimoottorin nopeus alenee kuorman kasvaessa nopeammin kuin sivuvirtamoottorin. Kuorman  $I_a$  kasvaessa seuraa, että momentti kasvaa voimakkaammin kuin sivuvirtamoottorin momentti. Kompoundimoottorin etuna on se, että moottori ei ryntää tyhjäkäynnissä kuten sarjamoottori. [9.]

### 3.2 Tasavirtaservomoottorit

Edellä todettiin, että virtamagnetoidun moottorin pyörimissuuntaa ei voida vaihtaa moottorin napajännitteellä. Kestomagnetoidun tasavirtamoottorin pyörimissuuntaa voidaan vaihtaa suoraan muuttamalla virran  $I_a$  suuntaa, koska kestopagneettien magneettikenttä ei muutu. Tasavirtaservomoottoreilla on laaja ja helposti säädettävä pyörimisnopeusalue, alhainen hitausmomentti, kyky kestää lyhytaikaista ylikuormitusta sekä hyvä maksimimomentin ja massan suhde. Servomoottori tuottaa kokoonsa nähden suuren vääntömomentin, jos siinä on tehokkaat kestopagneetit, suurta virtaa sietävä, runsaasti johdinta sisältävä sekä kauaksi pyörimisakselista ulottuva ankkurikäänitys. Moottorin tehot ovat luokkaa 5 W–10 kW. Staattorin kestopagneetteina käytetään yleensä alnico-, ferriitti- tai samariumkobolttimagneetteja. Servomoottorin roottorin akselin perään on yleensä asennettu mitta-anturi, joka mittaa laitteelle ominaista suuretta, kuten nopeutta tai asemaa. Tämä itse asiassa tekee kestopagnetoidusta moottorista tasavirtaservomoottorin. [8.]

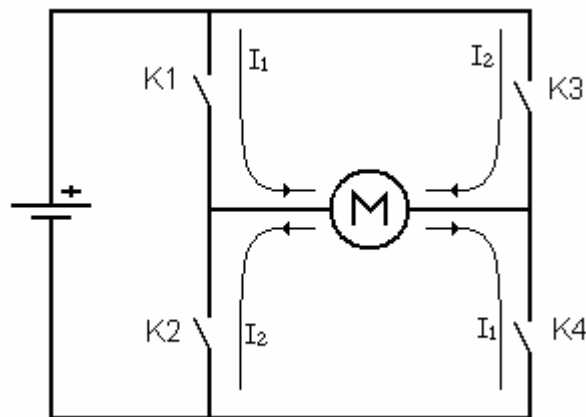
### 3.3 Tasavirtaservomoottorin ohjaaminen

Tasavirtaservomoottorin ohjaamiseen tarvitaan vahvistin, joka muuntaa ohjaussuureen toimilaitteelle eli moottorille sopivaksi toimsuureeksi. Vahvistimen tehtävänä on siis syöttää moottorille sen tarvitsema virta. Ankkurijännitteen säätäminen onnistuu digitaalitekniikalla helposti pulssinleveysmodulaatiolla (PWM, pulse width modulation). Pulssinleveysmodulaatiossa pulsseilla on vakio toistotaajuus, jossa pulssien leveyttä muutetaan. Pulssinleveys määrää moottorille syötettävän jännitteen arvon. Kuvassa 15 on esimerkki pulssinleveysmodulaatiosta.



Kuva 15. Pulssinleveysmodulaatio.

Servomootorin ankkurivirran kääntämiseen on yksinkertainen kytkentä, joka koostuu neljästä kytkimestä. Nämä kytkimet ovat yleensä puolijohdekomponentteja. Kytkentää sanotaan H-siltakytkennäksi (H-Bridge). Kuvasta 16 ilmenee periaatteellinen tasavirtaservomootorin ohjauskytkentä.



Kuva 16. Tasavirtaservomootorin H-siltavahvistin.

Kytkimien K1–K4 tiloja muuttamalla voidaan moottorin läpikulkevaa virran suuntaa muuttaa. Taulukosta 2 selviää eri tilojen toiminnallinen merkitys. On varmistuttava siitä, ettei kytkentä joudu koskaan oikosuljettuun tilaan. Tällä voi olla hyvinkin tuhoisia vaikutuksia.

Taulukko 2. H-siltakytkennän tilat.

K1	K2	K3	K4	MERKITYS
1	0	0	1	Pyörimissuunta myötäpäivään ( $I_1$ )
0	1	1	0	Pyörimissuunta vastapäivään ( $I_2$ )
0	0	0	0	Vapaa
0	1	0	1	Jarru
1	1	1	1	Oikosulku

Vahvistimessa kytkiminä käytetään nopeita pienihäviöisiä puolijohdekytkimiä. Kytkimiä ohjataan korkealla parhaimmillaan yli 20 kHz:n kytkentätaajuudella. Tämä takaa moottorille tasaisen virran. Pääteasteen toiminta pysyy tällöin myös äänettömänä, koska kytkentätaajuus ylittää ihmisen kuuloalueen. MOSFET soveltuu parhaiten suurta kytkentätaajuutta ja pientä tehoa vaativiin sovelluksiin, esimerkiksi alle 1 kW:n servokäyttöihin. IGB-transistorit soveltuvat maksimissaan jopa 1 MW:n suuritehoisiin sovelluksiin. MOSFET-kytkinten ohjausjännite on luokkaa 10–15 V. [1.] [5.]

## 4 TYÖN TOTEUTUS

Laitteen suunnittelu aloitettiin kartoittamalla laitteen vaatimukset ja toiminnot.

Laitteen vaatimusmäärittelyssä laadittiin seuraavat vaatimukset:

- Ohjainta ohjataan TTL-tason signaalilla käyttäen step/dir-ohjaustapaa.
- Ohjain lukee quadrature-signaalia.
- Ohjain ohjaa tasavirtaservomootoreita.
- Ohjain on helppokäyttöinen, nopeatoiminen, pienikokoinen, tehokas ja turvallinen.

Lisäksi laitteelle laadittiin tuotemäärittely, jossa kerrotaan tuotteen teknisiä tietoja.

Laitteen tuotemäärittelyssä laadittiin seuraavat tekniset tiedot:

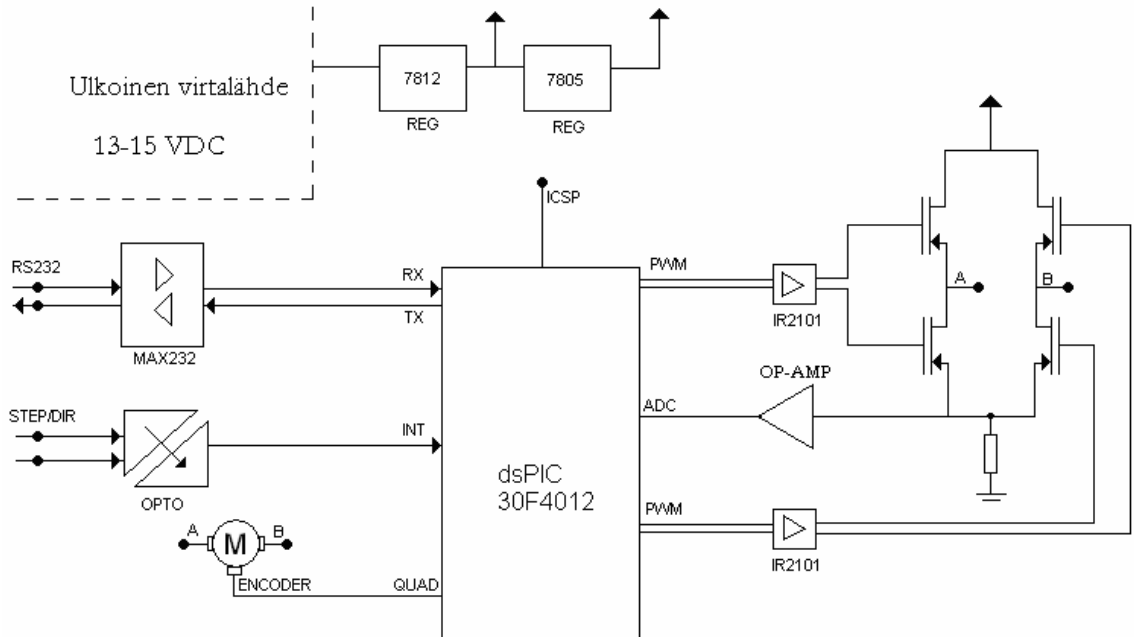
- mikrokontrolleri: dsPIC30F4012
- piirilevyn äärimitat 100 mm x 160 mm
- tehonsyöttö: ulkoinen käyttöjännite 13–15 V noin 500 mA
- ulkoiset liitännät: käyttöjännitteille, encoder, sarjaportti, step/dir, ICSP.

Laitteesta on tarkoitus tehdä aluksi proto käyttäen läpiladottavia komponentteja mittausten ja mahdollisten korjailujen helpottamiseksi. Kun protolaite on saatu toimimaan halutulla tavalla, on ohjaimen piirilevy tarkoitus suunnitella uudestaan pienempään kokoon käyttäen pintaliitoskomponentteja.



#### 4.1 Elektroniikan suunnittelu

Elektroniikan suunnittelu aloitettiin suunnittelemalla kytkennästä lohkokaaviomainen kuva. Kuvasta 17 käy ilmi eri lohkot suunnitellusta servo-ohjaimesta.

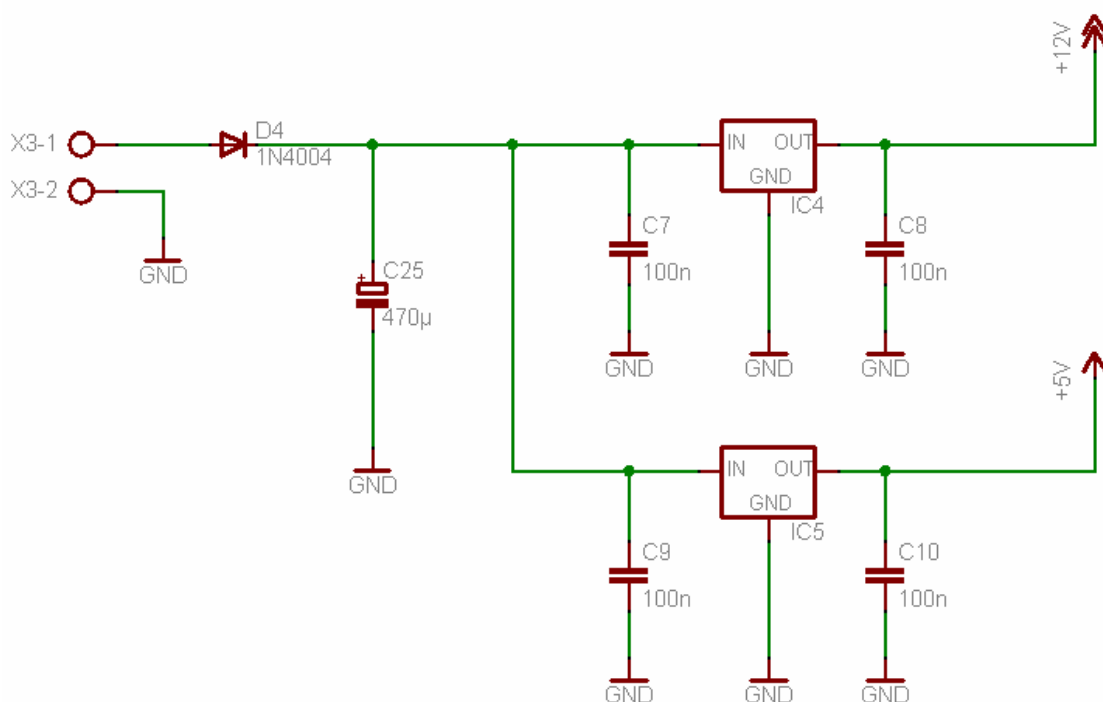


Kuva 17. Servo-ohjain lohkokaaviotasolla

Seuraavaksi käydään läpi kaikki kuvan 14 lohko-osiot.

##### Jännitelähde

Ohjain saa virtansa ulkoisesta virtalähteestä. Tulojännite muunnetaan kuvan 18 mukaisesti sopiviksi eri piireille. Tulojännite ulkoisella virtalähteellä tulee olla luokkaa 13–15 V. Regulaattoreina käytettiin yleisiä regulaattoripiirejä 7805 ja 7812.



Kuva 18. Jännitelähde.

Diodilla D4 estetään laitteen rikkoutuminen, jos käyttöjännite kytketään vahingossa tuloliittimeen napaisuudeltaan väärinpäin. Jännite suodatetaan mahdollisilta jännitepiikeiltä kondensaattoreilla C7–C10. Kondensaattorin C25 tehtävänä on stabiloida jännitettä mahdollisilta jännitenotkahtamisilta. Piirilevyllä jokaisen mikropiirin käyttöjännitetulopinnan ja maapinnan läheisyydessä on keraaminen kondensaattori, jonka tehtävänä on suodattaa käyttöjännite mahdollisilta jännitehäiriöiltä. Häiriönpoistokondensaattorit ovat mikropiiristä riippuen luokkaa 10–100 nF.

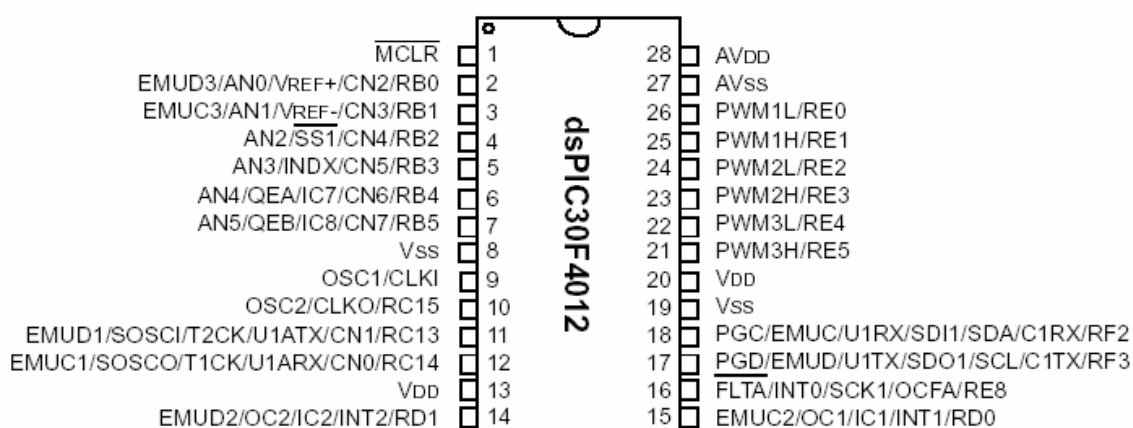
### Proessorilohko

Proessoriksi valittiin Microchipin valmistama dsPIC30F4012-kontrolleri. Piiri perustuu RISC-tyyppiseen suoritinarkkitehtuuriin. Kyseinen piiri valittiin, koska se soveltuu moottorin ohjaukseen hyvin ja Microchipin kontrollerit olivat ennestäänkin tuttuja. Prosessori sisältää kaikki tarpeelliset portit servomoottorin ohjaukseen. Prosessori on 16-bittinen ja sen suorituskkyky on noin 30 MIPS (Million Instructions per second). Se sisältää riittävästi ohjelmamuistia monimutkaisempienkin ohjelmien toteuttamiseksi. Taulukosta 3 ilmenee prosessorin ominaisuudet.

Taulukko 3. dsPIC30F4012:n ominaisuudet.

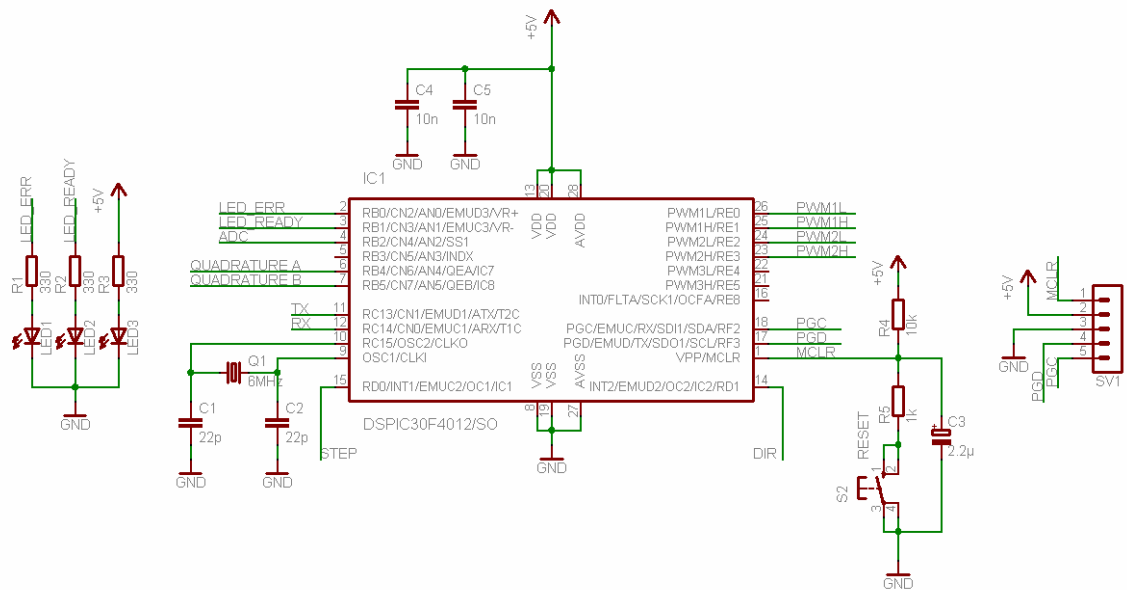
Pins	Program Mem. Bytes/ Instructions	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16-bit	Input Cap	Output Comp/Std PWM	Motor Control PWM	10- Bit A/D 1 Msps
28	48k/16k	2048	1024	5	4	2	6 ch	6 ch

Prosessori sisältää lisäksi tarpeellisen 16-bittisen quadrature encoder -portin, johon voidaan liittää pulssianturi. Quadrature-lohko sisältää myös ohjelmoitavan digitaalisen suodattimen. Prosessorin pinnijärjestys on esitetty kuvassa 19.



Kuva 19. dsPIC30F4012:n pinnijärjestys.

Kontrollerilohkon kytkentä on esitetty kuvassa 20. Siitä käy ilmi, mihin kukin pinni on kytketty. Kytkenässä on kolme lediä, joista yksi ilmoittaa virtojen olevan kytketty ja kaksi muuta ilmoittavaa ohjaimen tilan. Piirin resetointi tapahtuu kytkemällä MCLR-pinni maahan. Tämä tapahtuu reset-kytkimellä. Reset-kytkimen rinnalla oleva kondensaattori estää kytkimen kytkinvärähtelyä. Piiri ohjelmoidaan ICSP (In-Circuit Serial Programming)-liittimen kautta, mihin tarvitaan piirin pinnit PGC, PGD ja MCLR. Servo-ohjaimen ohjaussignaalit kytketään prosessorin keskeytyspinneihin INT1 ja INT2.

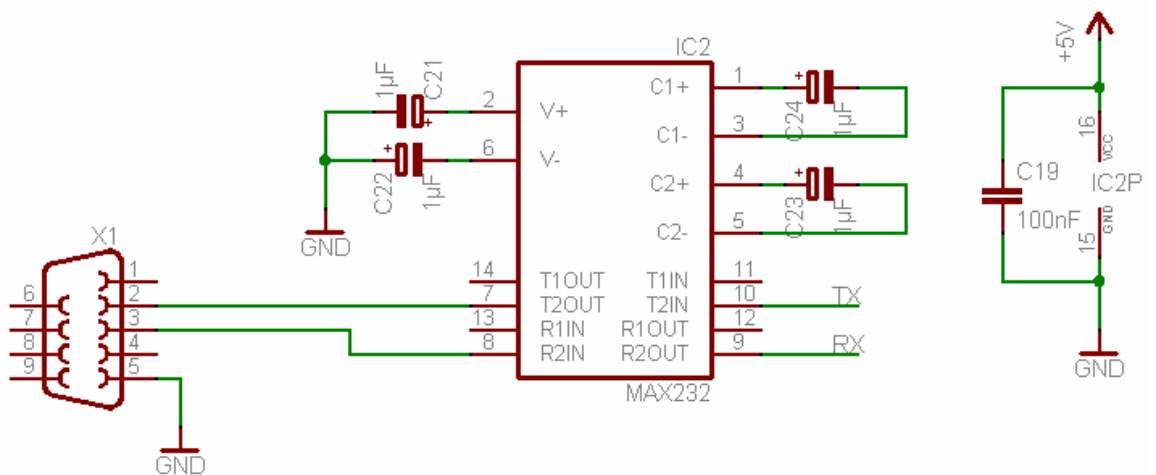


Kuva 20. Prosessorilohkon kytkentä.

Kiteeksi valittiin 6 MHz:n kide. Prosessorin PLL (Phase Locked Loop)-piiri kertoo kellotaajuuden kuudellatoista, joten prosessorin sisäinen kellotaajuus on 96 MHz.

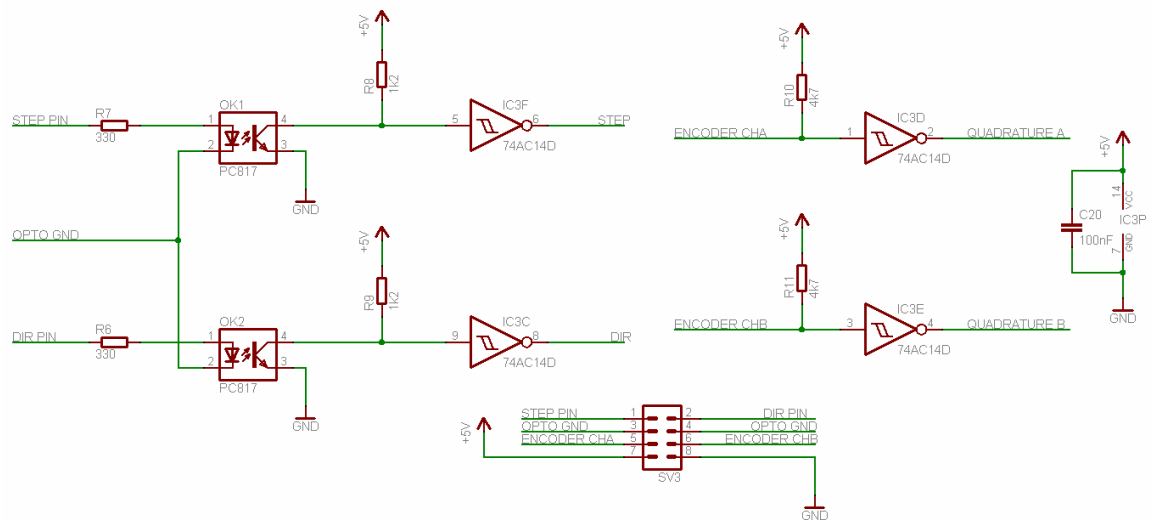
### Liitäntäpiirit

Laitteeseen tarvittiin liitäntämahdollisuus tietokoneeseen säätöarvojen muuttamiseksi. Tämä toteutettiin käyttäen kaksisuuntaista sarjaliikennettä. Sarjaliikennekytkentä on esitetty kuvassa 21. Kytkentä perustuu sarjaliikennemuunninpiiriin MAX232 toimintaan.



Kuva 21. Sarjaliikennekytkentä.

Piirilevyllä olevan RS232-liittimen ja tietokoneen välille tulee kytkeä suora sarjakaapeli. Ohjaimen tulosignaalit step ja dir on galvaanisesti erotettu ohjainyksiköstä. Tämä on toteutettu optoerottimien avulla. Galvaanisen erotuksen tarkoituksena on suojata tietokonetta mahdollisilta häiriöiltä. Galvaanisen erotuksen jälkeen tulosignaalit viedään schmitt-liipaisimen kautta prosessorille. Encoder- ja ohjaustulot on esitetty kuvassa 22.

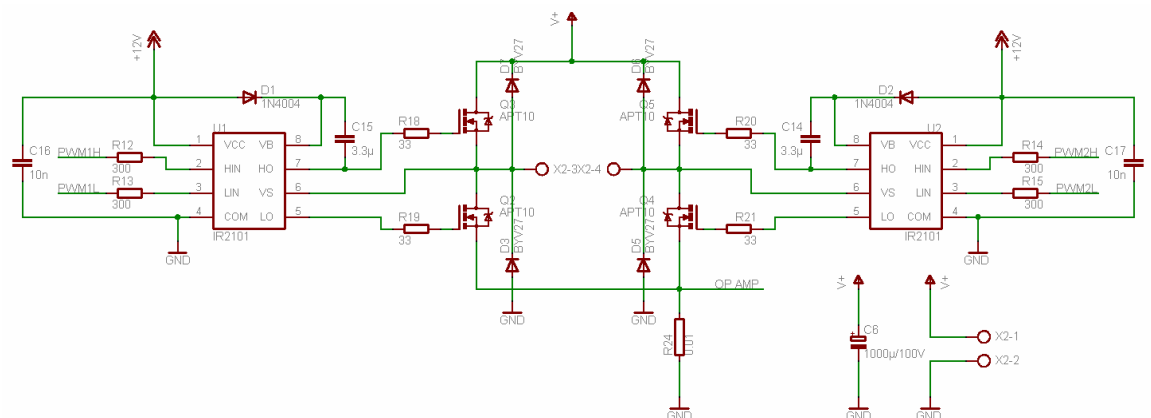


Kuva 22. Ohjauksen ja encoderin tulot.

Pulssianturin tulosignaalit kanavat A ja B tuodaan myös schmitt-liipaisimen kautta prosessorille.

## Pääteaste

Moottorin virranohjaus toteutettiin H-siltakytkennällä, joka on esitetty kuvassa 23.

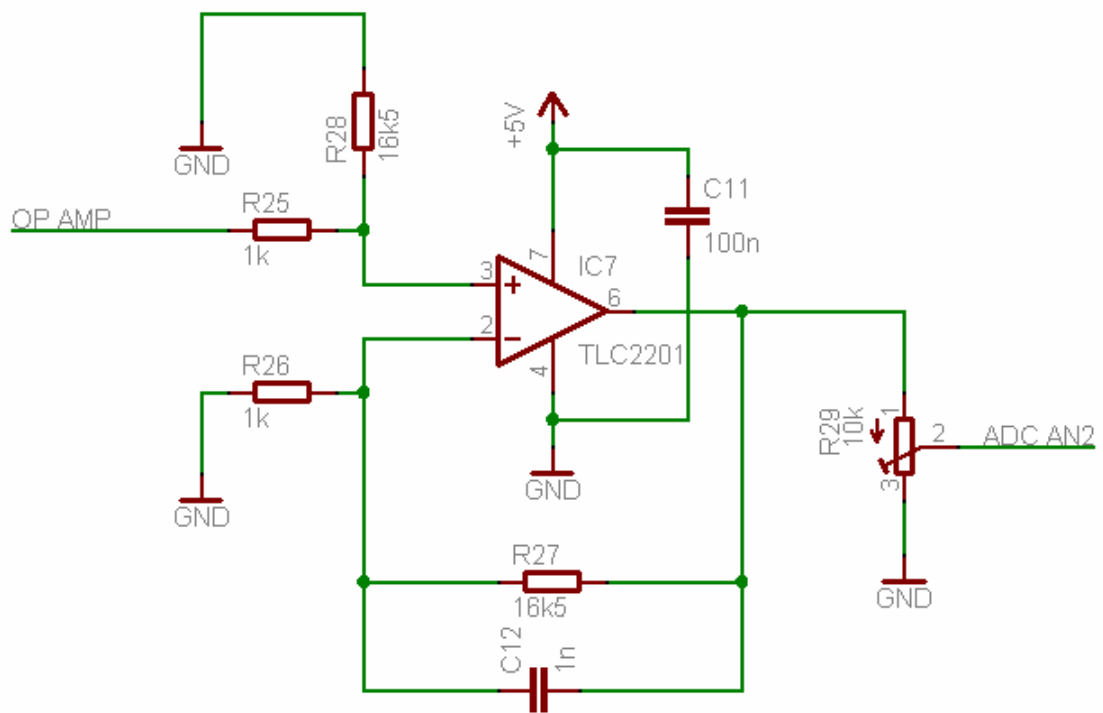


Kuva 23. H-siltakytkentä.

MOSFET-transistorit tarvitsevat ohjausjännitteeksi 10–15 V. Hilanohjauspiirit vahvistavat prosessorin pienivirtaisen PWM-signaalin sellaiseksi, että kytkimet aukeavat täysin ja riittävän nopeasti. Hilanohjauspiireinä käytettiin International Rectifierin valmistamia IR2101-hilanohjauspiirejä. H-sillan ohjaus toteutettiin siten, että hilanohjauspiirin HIGH-tuloihin syötetään PWM-signaali ja LOW-tuloihin looginen yksi tai nolla. Näin kytkentähäviöitä tulee vain yhteen kytkimeen kerrallaan. Hilanohjauspiirit sisältävät kaiken tarpeellisen puolisisillan ohjaukseen, joten kytkentään tarvitsee lisätä vain ulkoinen diodi ja bootstrap-kondensaattori. Vastukset R18–R21 ovat virranrajoitusvastuksia, joiden tehtävänä on rajoittaa hilanohjauspiirien ohjausvirtaa. Piirin jännitekestoisuus riittää 600 voltin ohjaukseen. MOSFET-transistoreiksi valittiin kohtalaisen suuritehoiset N-tyyppin kytkimet, joiden jatkuva virrankesto on 75 A ja jännitekesto 100 V. Kytkinten sisäinen resistanssi on kohtalaisen pieni, 0,019  $\Omega$ . Pienen resistanssin ansiosta kytkinten hukateho on pieni ja tällöin komponenttien lämmittävän tehon suuruus on pienempi. Kytkimien rinnalla olevien diodien tehtävänä on suojella kytkimiä jännitepiikeiltä, jotka voivat syntyä moottorin kelasta. MOSFET-transistoreille laitettiin jäähdytyslevy.

#### Virran mittaus

Ohjaimen suunniteltiin virran mittaus, joka mittaa moottorin läpikulkevaa virtaa. Virranmittaus on toteutettu mittaamalla vastuksen R24 (0,01  $\Omega$ ) yli olevaa jännitettä ja vahvistamalla tämä sopivaksi ennen prosessorin analogiatuloon viemistä. Prosessorin analogiatulon tuloalue on 0–5 V. Operaatiovahvistimeksi valittiin Texas Instrumentsin TLC2201, joka on rail to rail -tyypin operaatiovahvistinpiiri. Vahvistinkytkentä on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Vahvistinkytkentä.

Ohjain suunniteltiin mittaamaan virtaa maksimissaan kolmeenkymmeneen ampeeriin asti. Tämän tiedon perusteella voidaan määrittellä vastuksen R24 yli oleva jännite, joka on maksimissaan, kun virta on 30 ampeeria.

$$U = IR = 30A \cdot 0,01\Omega = 0,3V$$

Kun vastuksen yli oleva maksimijännite on ratkaistu, saadaan vahvistimen tarvitsema vahvistus laskettua.

$$A_U = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{5V}{0,3V} = 16,66$$

Differentiaalivahvistimen vahvistus määritellään vastuksilla. Oikeitten komponenttiarvojen saamiseksi täytyy toinen vastuksen arvo valita. Valittiin 1 kΩ:n vastus, jolle laskettiin pari.

$$A_U = \frac{R27}{R25} \Rightarrow R27 = \frac{A_U}{R25} = \frac{16,66}{1k\Omega} = 16,6k\Omega$$

Vastuksen R27 rinnalle laitettiin kondensaattori, joten kytkentä toimii itse asiassa integraattorina. Tarkoituksena tällä kondensaattorilla on suodattaa signaalista PWM:n aiheuttama häiriösignaali.

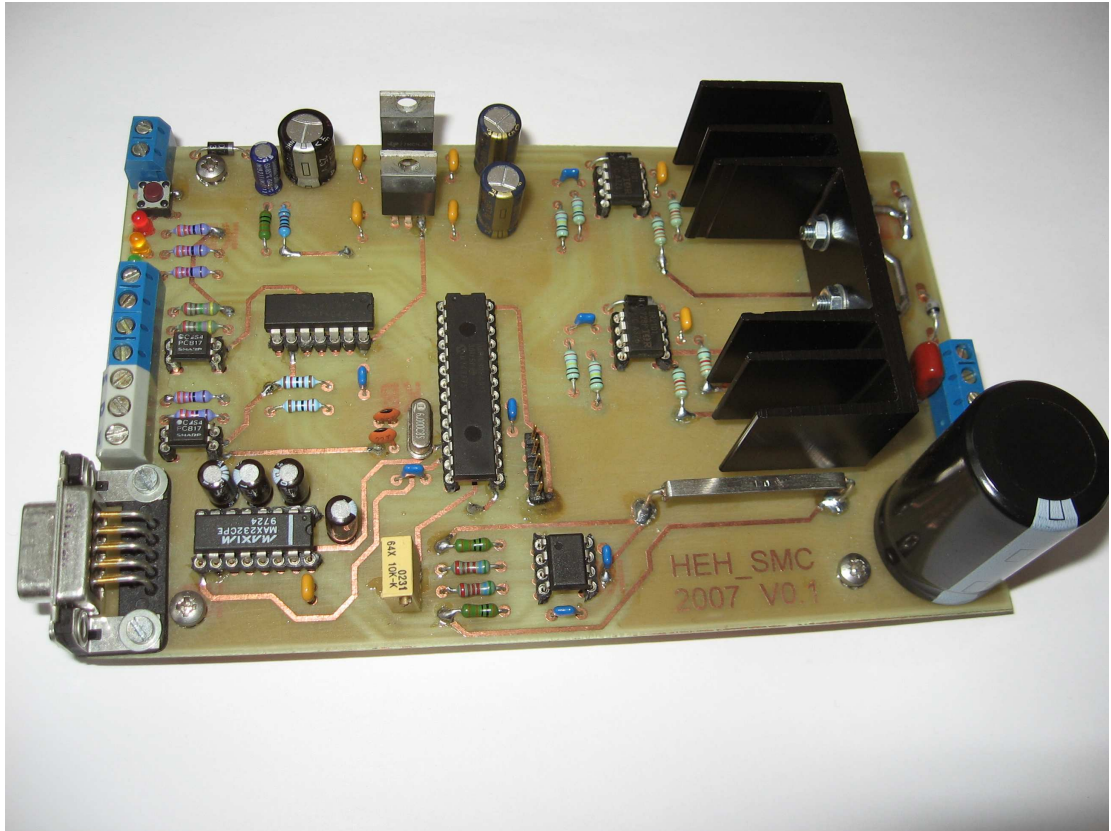
## 4.2 Piirilevyn suunnittelu

Piirilevyjen suunnitteluohjelmistona käytettiin ilmaista Eagle Cadsoft -piirilevynsuunnitteluohjelmistoa. Protolaitteen komponentteina päädyttiin käyttämään läpiladottavia komponentteja ja levystä tehtiin tarkoituksella isokokoinen, jotta testauksessa tehtävät mittaukset ja muutokset olisi helpompi toteuttaa.

Piirikortti suunniteltiin kaksipuoliseksi, jossa piirilevyn pohjapuoli valittiin yhteiseksi maatasoksi. Piirikortti valmistettiin syövyttämällä paremman lopputuloksen aikaansaamiseksi. Piirilevysuunnittelun työnä saadut foliokuvat tulostettiin kahdelle läpinäkyvälle kalvolle. Kalvoja tulostettiin kaksi kummallekin puolelle, jotta kalvon foliota kuvaavat mustat alueet olisivat mahdollisimman huonosti valoa läpäiseviä. Foliokuvista tehtiin kirja, jonka väliin valotuslakalla käsitelty kaksipuolinen piirilevy laitettiin. Piirilevy laitettiin valotuslaitteeseen, jossa piirilevyn päällä oleva lakka reagoi laitteen ultraviolettivaloon. Tämän jälkeen piirilevy kehitettiin kehitysaltaassa, jossa oli vahvaa emäksistä ainetta. Kehityksessä piirilevyn kuparipinnalta irtosi valoon reagoinut lakka. Kalvon mustien folio-osien alueelta lakka ei irronnut. Seuraavaksi piirilevy laitettiin syöpymään syövytysaltaaseen, jossa kupari syöpyi muualta paitsi folioilta. Piirilevyn pinnalta poistettiin jäljellä oleva lakka. Tämän jälkeen piirilevyyn porattiin reiät komponenteille, jotka sitten tinattiin levyille. Piirilevyn suurivirtaisen osan vedot vahvistettiin juottamalla vetoihin runsaasti tinaa. Piirilevyn alapuoli päällystettiin lakalla kuparin hapettumisen ehkäisemiseksi. Liitteenä 1 on kuva, josta selviää piirilevyn osasijoittelu ja kuparivedot.

Piirilevyn suunnittelussa käytettiin apuna myös Eagle Cadsoft -ohjelmaan saatavaa lisäosaa, jolla piirikaaviokuvista voidaan generoida kolmiulotteinen kuva. Generoitu kolmiulotteinen kuva on liitteessä 2, joka näyttää jokseenkin samanlaiselta kuin valmis protokortti. Kuvassa 25 on valmiiksi kasattu protokortti.





Kuva 25. Protolaitteen kuva.

#### 4.3 Ohjelmiston suunnittelu

Ohjelmiston suunnittelu aloitettiin piirtämällä vuokaavioita toteutettavasta ohjelmasta. Ohjelmointikielenä käytettiin C-kieltä. Ohjelman kirjoittamiseen ja testaamiseen käytettiin Microchip:n MPLAB-ohjelmointiympäristöä. Ohjelmointiympäristö on yksinkertainen ja helppokäyttöinen, ja se sisältää debuggerin, jolla voidaan simuloida ohjelman toimivuutta ja tutkia rekistereiden arvoja. Ohjelmistoa kehitettiin pienissä erissä siten, että mahdolliset ongelmat tulisivat aikaisin esiin.

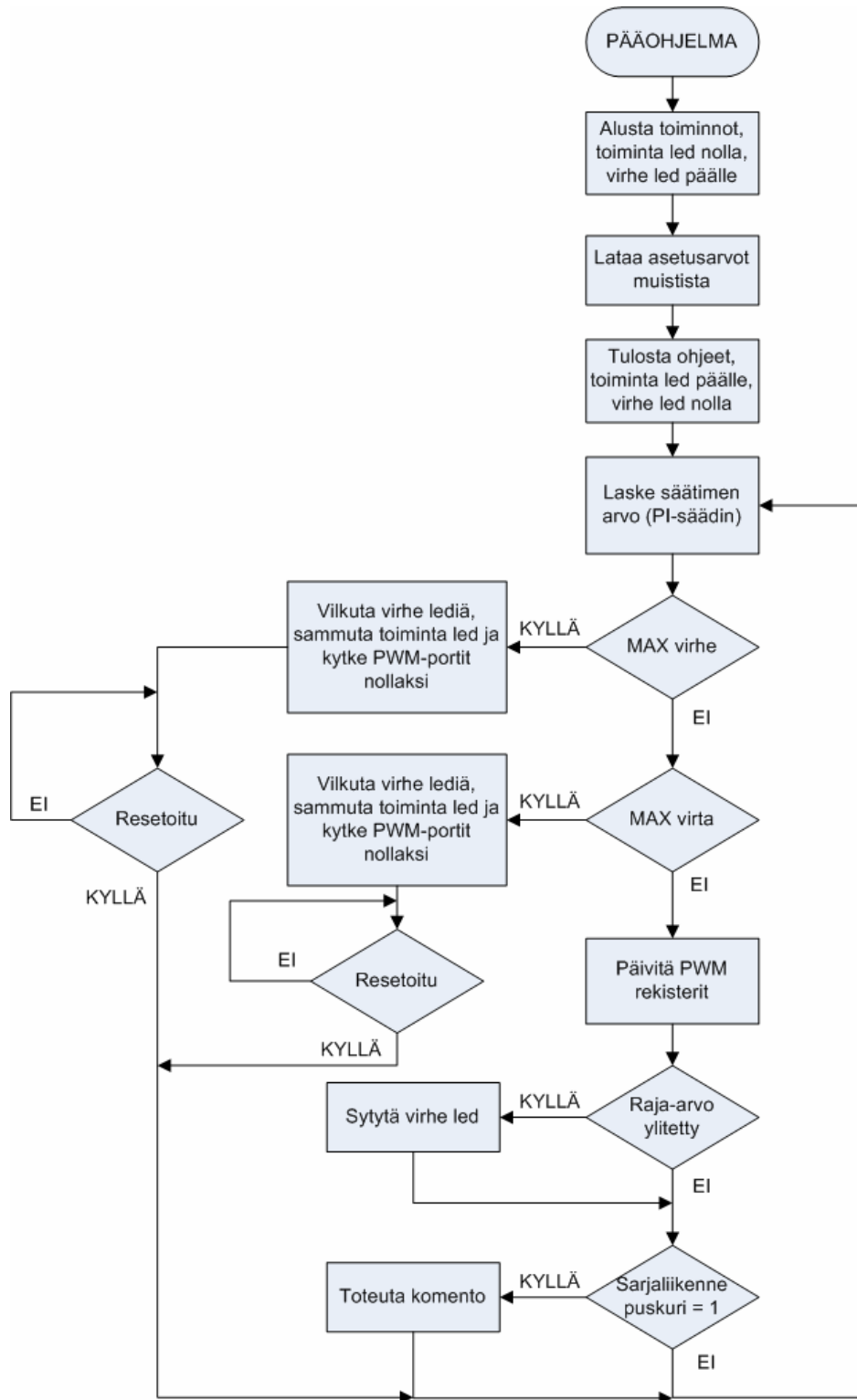
##### Pääohjelman toiminta

Kuvassa 26 on esitetty pääohjelman vuokaavio. Alussa ohjelma alustaa käyttöönotettavat toiminnot ja määrittää porttien suunnat. Seuraavaksi ohjelma lataa EEPROM-muistista tallennetut säätöparametriarvot.

Ohjelma siirtyy alkurutiinien jälkeen ikuiseen silmukkaan. Ohjaimeen toteutettiin ohjelmallisesti PI-säädin, jonka tehtävänä on laskea lähtösuure. Lähtösuure muodostetaan ohje-, takaisinkytkentäarvon ja säätöparametrien perusteella.

Ohjaimeen toteutettiin maksimivirhearvon seuranta. Virhearvo tarkoittaa tässä tapauksessa tiettyä erosuuretta, jolloin ohjain siirtyy virhetilaan, jos kyseinen raja-arvo ylitetään. Virhetilassa PWM-rekistereiden arvot tyhjennetään. Tällöin moottorin läpi ei kulje virtaa eli moottori ei pyöri. Virhetilassa ohjaimen virheledi alkaa vilkkua tiedoksi, että virhe on toteutunut. Virhe voidaan kuitata painamalla ohjaimen reset-painiketta tai hyväksyä virhe HyperTerminal-ohjelmalla. Kun virhetila on hyväksytty, ohjelma palaa normaaliin toimintaansa. Tarkoituksena tällä virhetilalla on ehkäistä tilanteita, jossa moottoriin kohdistuu liian suuri kuorma, eikä moottori kykene pyörimään.

Ohjain mittaa moottorin läpikulkevaa virtaa, joka tuodaan jännitearvona prosessorin analogiatuloon. Jännitearvosta muodostetaan sitä vastaava virta-arvo. Ohjaimeen voidaan määrittää maksimivirta-arvo, mikä moottorin läpi saa kulkea. Jos maksimivirta-arvo ylitetään, siirtyy ohjelma virhetilaan, missä kytketään PWM-portit nolnaan. Tällä ehkäistään mahdollinen moottorin tai laitteen hajoaminen. Virheledi ilmoittaa vilkkumisellaan virhetilan tapahtuneen. Virhe voidaan kuitata painamalla ohjaimen reset-painiketta tai hyväksyä virhe HyperTerminal-ohjelmalla. Kun virhetila on hyväksytty, ohjelma palaa normaaliin toimintaansa.



Kuva 26. Pääohjelman vuokaavio.

Lasketusta säätöarvosta muokataan arvo, joka päivitetään PWM-rekisteriin. Rekisterin arvo muuttaa pulssinleveyden pituutta. PWM-signaalin taajuudeksi on määritelty PWM-porttien alustuksessa 24 kHz. Tämä takaa sen, ettei ihminen kuule puolijohdekytkimien kytkentääntä. PWM-rekistereiden päivityksen jälkeen ohjelma tutkii, onko raja-arvo ylitetty. Jos raja-arvo on ylitetty, sytytetään virheledi. Tämän tarkoituksena on ilmaista, milloin moottoriin kohdistuu kuorma. Kuorman vaikutuksesta oloarvoon ja ohjearvoon jää poikkeama, mitä raja-arvo tässä tapauksessa tarkoittaa. Lopuksi ohjelma toteuttaa sarjaliikennetoiminnon, jos sarjaliikenneilmoitus on aktiivinen. Sarjaliikennetoiminnan tehtävänä on toteuttaa tietokoneelta lähetettyä sanomaa vastaava tehtävä. Muutettaessa jotakin säätöparametrin kertoimen arvoa ohjelma tallentaa uuden arvon EEPROM-muistiin.

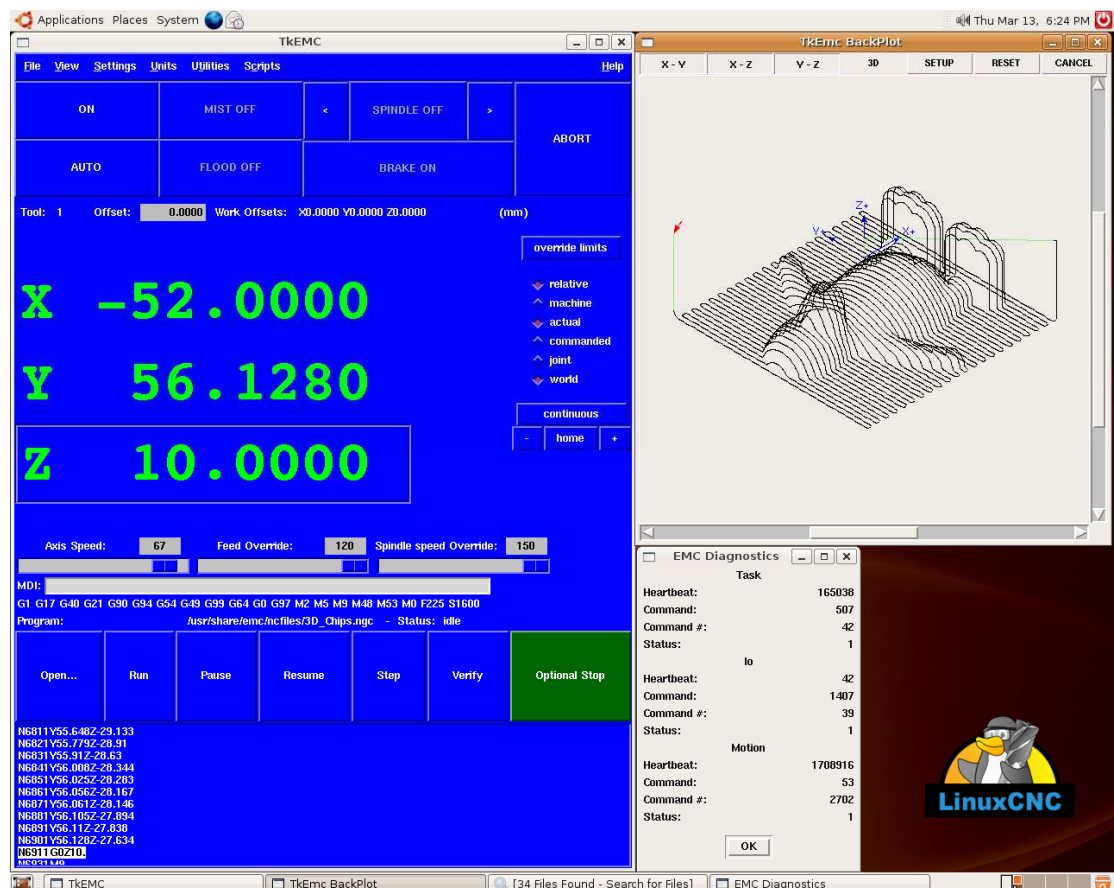
Ohjaimeen toteutettiin säätöparametrien muuttamiseen käyttöliittymä, jota tarvitaan ohjaimen virittämisessä. Kuvassa 27 on ohjaimen tulostamat ohjeet, joiden perusteella voidaan säätöparametreja muuttaa.

```
*****
* OHJEET:
* Muuta arvoa kirjoittamalla ensin saadettavan parametrin
* kirjain ja peraan sen arvo esim. p0.5
*****
* p x.x proportionaali vahvistus
* i x.x integraali vahvistus
* m x.x max teho
* a x.x max virta
* f x.x max virhe
* b x.x kuollut alue
* x n asettaa ohje arvon kertojan (1-16)
* t n asettaa integrointiajan kertoimen
* + n aseta positiivinen ohjearvo
* - n aseta negatiivinen ohjearvo
* v vakioasetukset
* e tulostaa encoderin laskurin arvon
* I tulostaa virta-arvon
* n tulostaa nykyiset asetukset
* s tulostaa saatoarvot
*****
```

Kuva 27. Ohjaimen säätöparametrien käyttöliittymä.

## 5 TESTAUS JA VIRITTÄMINEN

Laitteen suunnittelussa testattiin eri lohkot koekytentäalustalla ennen piirikortin suunnittelua. Tällä pyrittiin saamaan kytkentä toimimaan halutulla tavalla. Ohjelmiston testauksessa käytettiin apuna debuggeria. Ohjelmisto toteutettiin pienissä osissa, joita testattiin yhdessä elektroniikan kanssa. Prosessoripiirin ohjelmointiin käytettiin piirinvalmistajan valmistamaa ohjelmointilaitetta (PIC-kit 2). Servo-ohjaimen testauksessa käytettiin EMC2 (the Enhanced Machine Control)-ohjelmistoa, joka toimii Linux-pohjaisessa Ubuntu-käyttöjärjestelmässä. Ohjelma on ilmainen, ja se on lisensoitu GNU GPL (General Public License)-lisenssillä. Ohjelma on suunniteltu ohjaamaan erilaisia konetyökaluja, kuten robotteja, sorveja, jyrsin- ja leikkuukoneita. Kuvassa 28 on kuvankaappaus ohjelman käyttöliittymästä.



Kuva 28. EMC2-ohjelman käyttöliittymä.

Ohjaus tapahtuu tietokoneen rinnakkaisportin kautta, jossa yhden moottorinohjaimen ohjaukseen tarvitaan kolme johdinta; step, dir ja maa. Step- eli askelluspulssilla määritellään moottorin pyörimisnopeus, ja dir- eli suuntapulssilla määritellään moottorin pyörimissuunta. Askelluspulssi on toteutettu pulssintaajuusmodulaatiolla (PFM, Pulse Frequency Modulation), jossa signaalin taajuus määrittää moottorin pyörimisnopeuden. Moottorin pyörimissuuntapulssi on looginen ykkönen tai nolla. Ohjelma tukee G-koodia, joka on yleinen CNC-koneiden työstöratojen ohjauskieli.

### 5.1 Ohjaimen virittäminen

Ohjaimen viritysparametreja muutetaan HyperTerminal- tai vastaavan ohjelman kautta. Tärkeimmät viritysparametrit hyvän säädön kannalta ovat P- ja I-säädön vahvistus. Säättöä testattiin kokeilemalla eri P- ja I-säädön vahvistusarvoja. Testaamisessa todettiin, että teoriassa opitut asiat pätevät myös käytännössä. P-säädön vahvistuksen ollessa suuri huomattiin, että säätö alkaa värähdellä eli moottori värähtelee laidasta laitaan. Kun P-säädön vahvistus on pieni, huomattiin, että säätöön jää poikkeama, eli moottori ei pyörähdä ohjearvon mukaiseen asemaansa. Luvussa 2.3.2 todettiin, että integroivan osan tehtävänä on poistaa P-säädössä tapahtuvaa poikkeamaa. Testattiin tämän toimivuutta myös käytännössä. I-termiä testattaessa asetetaan aluksi P-säätimen vahvistusarvo kohtalaisen pieneksi ja I-termin vahvistus nolleen niin, että se jättää selvän poikkeaman ohjearvosta. Kun I-termin vahvistusta kasvatetaan pikku hiljaa, huomattiin, että tietyllä I-termin arvolla poikkeama poistui. I-termin ollessa liian iso todettiin säätimen alkavan värähdellä.

### 5.2 Ohjaimen lopputestaus

Ohjaimen alkutestaukseen käytettiin pienikokoista 12 V:n servomoottoria, jossa pulssianturin indeksien määrä on noin kaksituhatta kappaletta kierrokselle. Laitetta testattiin aluksi pelkällä signaaligeneraattorilla, jolla syötettiin step-tulokanavaan kantiaaltoa. Testauksessa huomattiin, että ohjaimen tulosignaalisissa tapahtui optoerottimien jälkeen leikkautumista yli 4 kHz:n taajuudella. Tämä johtui optokomponenteista, joilla toimintataajuus on rajallinen. Tällöin signaali ei päässyt prosessorille oikeassa muodossaan, ja ohjaus ei toiminut oikein. Ongelma saatiin ratkaistua vaihtamalla optoerottimien

oheiskomponenttien arvoja, eikä kyseisiä piirejä tarvittu vaihtaa nopeampiin. Korjauksen jälkeen signaalin leikkaantuminen alkoi vasta 20 kHz:n jälkeen, mikä riittää hyvin moottorin nopeampaankin pyörimisnopeuteen. Alkuvaiheen testauksissa huomattiin prosessorin lämpenevän suhteellisen kuumaksi. Prosessorin luultiin jopa palaneen. Tämä johtuu kuitenkin prosessorin suuresta kellotaajuudesta, jolloin prosessori tarvitsee suuremman tehon. Ohjaimen virrankulutukseksi mitattiin 160 mA. Testauksessa huomattiin, että PWM:llä ohjatut kytkimet aiheuttavat virranmittaussignaaliin häiriötä. Tämä häiriösignaali saatiin suodatettua lisäämällä operaatiovahvistinkytkentään yksi kondensaattori.

Kun ohjain oli saatu toimimaan halutulla tavalla, testattiin sitä EMC2-ohjelmalla. Ohjelmalla ajettiin erilaisia työstöratakoodeja, joissa on nopeita tilanvaihdoksia. Tällä päästiin näkemään ohjaimen todellinen toimivuus. Testauksessa todettiin, että säätöarvoilla on merkittävä vaikutus ohjaimen toimivuuteen. Mitä nopeammin säädön haluttiin toimivan, sitä herkemmin ohjain tekee virhettä värähtelyllään. Säädön ollessa hitaampi saatiin säädölle virheettömämpi toimivuus.

## 6 TYÖN ANALYSOINTI

Työssä saatiin suunniteltua ja toteutettua tasasähköservomootoreiden ohjain. Ohjaimelle annetut vaatimukset täytettiin ja työssä päästiin hyvään lopputulokseen.

Insinöörityö oli haastava ja monipuolinen. Elektroniikan suunnittelussa ei esiintynyt juuri hankaluuksia, koska kytkennät suunniteltiin mahdollisimman yksinkertaisesti. Työn alkuvaiheessa ongelmia oli eniten ohjelmoinnissa, mutta nekin taidot kehittyivät työn suorituksen aikana. Eniten ohjelmoinnissa teetti vaikeutta PWM-porttien alustus ja ohjaus. Ohjaimen säätö oli tarkoitus toteuttaa aluksi pelkällä P-säädöllä, mutta työn aikana kehittynyt C-kielen ohjelmointitaito antoi mahdollisuuden tehdä lopulliseen laitteeseen PI-säätimen. Ohjelmoinnissa oli suurena apuna Microchipin internetsivulta ladattavat ohjelmaesimerkkikoodit. Ohjelman testaus oli alussa hankalaa yhdessä elektroniikan kanssa, koska ammattikorkeakoululla ei ollut ohjelmointikielen kääntäjää kyseiselle prosessorille. Ohjelmoinnin helpottamiseksi hankittiin PIC-kit 2 -ohjelmointityökalu, joten elektroniikan ja ohjelmiston testaus onnistui helposti kotonakin. Melkein kaikki ohjaimen osat tilattiin näytekappaleina eri valmistajilta, ja näin saatiin laitteen kustannukset minimaalisiksi. Työssä huomattiin, kuinka H-sillan kytkimet alkavat ääntää alle 20 kHz:n taajuudella, jonka ihmisen korvakin aistii. Tämän takia PWM-taajuus nostettiin hieman yli 20 kHz. Työssä todettiin, että säätimen täytyy olla hyvin viritetty, jotta siitä on hyötyä.

Ohjainta ei päästy vielä testaamaan omarakenteisessa jyrsinkoneessa, koska sopivia moottoreita ei vielä jyrsinkoneeseen löytynyt. Servomootoreiden valmistajia on useita, mutta käytettyjä ja halpoja servomootoreita on vaikea löytää.

Laitetta on tarkoitus kehittää jatkossa eteenpäin. Työn aikana tutustuttiin myös muihin moottorityyppeihin, kuten vaihtosähkömoottoreihin ja harjattomiin tasavirtamoottoreihin. Tulevaisuudessa laitteesta on tarkoitus suunnitella ohjain, jolla voitaisiin ohjata myös harjattomia tasavirtamoottoreita. Harjaton tasavirtamoottori on noussut nykyaikana suosituimmaksi moottorityypiksi, jonka ominaisuudet ovat paremmat kuin harjallisen. Harjattoman tasavirtamoottorin ohjaus on tosin hieman hankalampaa. Työn loppuvaiheessa ohjaimelle suunniteltiin myös LabVIEW-ohjelmalla toteutettu käyttöliittymä, jolla säätöparametreja voidaan muuttaa. Käyttöliittymä jäi kuitenkin vielä insinöörityön osalta hieman keskeneräiseksi. Ohjaimelle mietittiin kotelointia, mutta se päätettiin jättää tekemättä.



Koska kolmeakselinen jysinkone tarvitsee kolme ohjainta, koteloidaan kaikki kolme ohjainta tulevaisuudessa yhteen ja samaan koteloon. Ohjaimeen voitaisiin myös suunnitella häiriönsuojauspiiri moottorille, koska PWM-ohjatut tehokytkimet ovat suuri häiriönlähde suuremmilla tehoilla. Testauksessa ohjaimen ei kuitenkaan huomattu aiheuttavan häiriötä muihin laitteisiin.

## 7 YHTEENVETO

Työssä tutustuttiin servo-, säätötekniikan ja tasavirtamoottoreiden teoriaan sekä suunniteltiin laite, jolla voi ohjata tasavirtaservomoottoreita. Servo-ohjain ottaa tietokoneelta vastaan ohjearvon ja ohjaa moottorin sitä vastaavaan asemaan. Laite on suunniteltu erityisesti jysinkoneiden ohjaimeksi.

Tietokoneelle on useita työstöohjelmia, joista tässä työssä käytettiin enimmäkseen Linux-käyttöjärjestelmään saatavaa EMC2-työstöohjelmistoa. Ohjainta testattiin myös Windows-käyttöjärjestelmään saatavilla ohjelmistoilla. Ohjain rakennettiin dsPIC30F4012-mikrokontrollerin ympärille, joka on suunniteltu moottorinohjaussovelluksiin. Ohjelmisto toteutettiin C-kielellä. Ohjaimen toteutettiin ohjelmallisesti PI-säädin, jonka tehtävänä on laskea säätöarvo ohje- ja takaisinkytkentäarvon perusteella. Ohjearvo saadaan tietokoneelta ja takaisinkytkentäarvo moottorin pulssianturilta. Ohjain mittaa moottorin läpikulkevaa virtaa. Tämän virran maksimiarvo voidaan määrittää ohjaimelle. Jos maksimiarvo ylitetään, kytkeytyy ohjain virhetilaan. Toiminnalla ehkäistään mahdolliset laitteiden hajoamiset, kun ohjaimella ajetaan isompikokoisia virtoja. Ohjaimen pääteaste, jonka tehtävänä on syöttää moottorille virtaa, toteutettiin H-siltakytkennällä.

Ohjainta testattiin pienikokoisella servomoottorilla. Tietokoneen ohjausohjelmistona käytettiin EMC2-ohjelmaa. Ohjelmalla ajettiin työstöratakoodeja ja seurattiin moottorin käyttäytymistä. Ohjaimen virityksessä todettiin, että PI-säätimen teoria pätee myös käytännössä.

Insinööri työ antoi hyvän kuvan sulautetun laitteen suunnittelusta ja sen toteuttamisesta. Työssä opittiin elektroniikan suunnittelua, ohjelmointia ja käyttämään uusia suunnittelutyökaluja. Teoriapuolella työ opetti hyvin paljon servo- ja säätötekniikan asioita. Työssä opittiin toteuttamaan projektiaikataulu, jonka mukaan työtä toteutettiin. Projektiaikataulu on esitetty liitteessä 3. Projektiaikataulussa pysyttiin hyvin ja työ saatiin toteutettua ajallaan valmiiksi. Työssä opittiin paljon hyödyllisiä asioita ja saatiin toteutettua laite, jota jatkossa tullaan kehittämään paremmaksi ja monipuolisemmaksi.

## LÄHTEET

- 1 Jaakko Fonselius, Jari Rinkinen, Matti Vilenius, Koneautomaatio: Servotekniikka. Oy Edita Ab, Helsinki 1998, ISBN 951-719-472-2
- 2 Miikka Kotamäki, Timo R. Nyberg, Koneautomaatio 2000. Valtion painatuskeskus, Helsinki 1992, ISBN 951-37-0702-4
- 3 Wikipedia, the free encyclopedia, Rotary encoder, luettu 16.1.2008 [www-dokumentti] [http://en.wikipedia.org/wiki/Rotary\\_encoder](http://en.wikipedia.org/wiki/Rotary_encoder)
- 4 Suomen Robotiikkayhdistys Ry, Robotiikka. Painopaikka Tumma Vuoden Kirjapaino Oy, Vantaa 1999, ISBN 951-9438-58-0
- 5 Jouko Niiranen, Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Hakapaino Oy, Helsinki 1999, ISBN 951-672-270-9
- 6 Jari Savolainen, Reijo Vaittinen, Sääntötekniikan perusteita. Gummerus Kirjapaino Oy, Saarijärvi 1998, ISBN 952-13-0042-6
- 7 Oulun yliopisto, Prosessi- ja ympäristötekniikan osasto, Systemiteknikan laboratorio. luettu 24.3.2008 [www-dokumentti] <http://cc.oulu.fi/~posyswww/opiskelu/sytelabrat/tyo1.pdf>
- 8 Mauri Airila, Mekatroniikka. Valopaino Oy, Helsinki 2004, ISBN 951-672-274-1
- 9 Lauri Aura, Antti J Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2: Sähkökoneet, WSOY:n graafiset laitokset, Porvoo 1986, ISBN 951-0-13479-1
- 10 Erkki Ruppä, Tuomo Lilja, Sähkötekniikkaa sivuaineopiskelijoille. Hakapaino Oy, Helsinki 1994, ISBN 951-719-032-8

## LIITTEIDEN LUETTELO

Liite 1: PIIRILEVYN LAYOUT-KUVA

Liite 2: EAGLE3D-SUUNNITTELUKUVA

Liite 3: PROJEKTIAIKATAULU

